

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Rafael Hafemann Moser

**ESTUDO DA COMBUSTÃO DE GÁS NATURAL, BUTANO E
ETANOL EM MEIO POROSO PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE
SÍNTESE**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Ph.D Amir Antônio
Martins de Oliveira Júnior

Florianópolis
2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

M899e Moser, Rafael Hafemann

Estudo da combustão de gás natural, butano e etanol em meio poroso para a produção de gás de síntese [dissertação] / Rafael Hafemann Moser ; orientador, Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior. - Florianópolis, SC, 2011.

94 p.: il., tabs., grafs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Materiais porosos. 3. Gás como combustível. 4. Combustíveis líquidos. 5. Combustão. 6. Gás natural. 7. Butano. 8. Álcool. I. Oliveira Júnior, Amir Antonio Martins de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

Rafael Hafemann Moser

ESTUDO DA COMBUSTÃO DE GÁS NATURAL, BUTANO E ETANOL EM MEIO POROSO PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Florianópolis, 31 de outubro de 2011.

Prof. Dr. Júlio César Passos,
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof., Ph.D. Amir Antonio Martins Oliveira Júnior,
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof., Dr. Edson Bazzo,
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof., Dr. Pedro Teixeira Lacava,
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

Prof., Dr^a. Thamy Cristina Hayashi,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Renê e Helenice,
a meu irmão, Bruno,
À Raquel,
e aos demais familiares pelo amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo apoio e dedicação investidos em mim durante todos esses anos. Agradeço ao meu irmão, avós e tios por terem contribuído cada um a sua maneira.

À Raquel pelo carinho, companheirismo e conselhos tão preciosos.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida e ao CNPq pelo financiamento da pesquisa através do Edital Universal 2006.

Ao professor Amir Oliveira pela orientação e ensinamentos desde os tempos da graduação. Agradeço sua amizade e confiança no meu trabalho.

Ao Rafael Catapan e ao Fernando Pereira por estarem sempre dispostos a me ajudar no desenvolvimento do trabalho, com orientações e sugestões valiosas.

Aos professores Edson Bazzo, Pedro Lacava e Thamy Hayashi pela disposição em avaliar o trabalho e pelas importantes contribuições.

Ao Edevaldo Brandílio, Antônio Vincentim, Edgar Favaretto e Eduardo Hartman pelo auxílio imprescindível nos experimentos.

Aos demais colegas do LabCET pela cooperação, amizade e por tornarem o ambiente do laboratório um lugar tão agradável. Em especial: Roberto, Cirilo, Renzo, Luis Evelio, Sara, Ricardo, Myiake, Oba, Talita, Gilson, Jaime, Berti, Álvaro, Nury, Andreas, Roberta, Fabyo, Leonel, Matelli.

Aos meus amigos e colegas de mestrado: Gil, Amaury, Damas, Joel, Paulo, Augusto, Maurício, Borin, pelas noites de estudo no Polo, pelas cervejadas, churrascos e futebol.

RESUMO

Este trabalho trata sobre a combustão de gás natural, butano e etanol em um queimador poroso visando o desenvolvimento de reatores porosos para produção de gás de síntese ($H_2 + CO$). Para a realização dos testes, foi construída uma bancada experimental que permite a combustão de combustíveis líquidos e gasosos. O estudo foi realizado para uma ampla faixa de razão de equivalência, avaliando desde chamas pobres até chamas ricas em combustível. Para cada combustível testado são apresentadas distribuições de temperatura no meio poroso, diagrama de estabilidade de chama e análise da composição dos produtos. Os resultados para combustão pobre de gás natural e butano indicam velocidades de chama até 4,4 vezes maiores que a velocidade de chama laminar na mesma razão de equivalência. O limite inferior de inflamabilidade foi ampliado em 20% para o gás natural e 21% para o butano. Para os dois combustíveis foram medidas temperaturas no meio poroso acima da temperatura de chama adiabática. O maior excesso de temperatura foi registrado para a combustão de gás natural no ponto de operação $\Phi=0,5$ e $u_{ch}= 22,5$ cm/s, onde a temperatura medida ultrapassou em 17% a temperatura de chama adiabática para a mesma condição inicial da mistura reagente. Nos testes de combustão rica de butano e etanol também foram medidas velocidades de chama acima da velocidade de chama laminar e temperaturas no meio poroso acima da temperatura de chama adiabática. No entanto, para a combustão rica de gás natural as velocidades de chama são da mesma ordem que a velocidade de chama laminar e as temperaturas no queimador chegam a ser 20% menores que a temperatura de chama adiabática correspondente. As medições de CO e CO₂ foram comparadas com o equilíbrio químico e mostraram o mesmo comportamento em função da razão de equivalência. Porém, simulações de um reator *plug flow* realizados no software *Chemkin*® mostraram uma cinética muito lenta para combustão rica, indicando que o tempo de residência dos reagentes no queimador é insuficiente para atingir o equilíbrio químico. A maior produção de gás de síntese prevista na análise acontece na combustão de etanol em $\Phi=2,3$, chegando a 29% em volume (11,3% de $H_2 + 17,7\%$ de CO). Calculando a perda de calor do queimador poroso, a máxima eficiência térmica foi estimada em 80%.

Palavras-chave: Queimador poroso, Combustíveis gasosos e líquidos, Combustão rica, Produção de gás de síntese.

ABSTRACT

This work investigates the combustion of natural gas, butane, and ethanol in a porous burner for the development of porous reactors to produce syngas ($\text{CO} + \text{H}_2$). An experimental apparatus was built to test premixed combustion of liquid and gaseous fuels. The study was performed for a wide range of equivalence ratio, from lean to rich combustion. Temperature distributions inside the porous media, stability diagrams and the composition of combustion products are presented for each fuel tested. For lean combustion of natural gas and butane the measured flame speeds were up to 4,4 times higher than the laminar flame speed in the same equivalence ratio. The lower flammability limit was extended by 20% for natural gas and 21% for butane. Temperatures in the porous media above the adiabatic flame temperature were measured for both fuels. The largest temperature excess was recorded for the combustion of natural gas in the operating point $\Phi = 0,5$ and $u_{\text{ch}} = 22,5$ cm/s, where the measured temperature exceeded by 17% the adiabatic flame temperature. For rich combustion of butane and ethanol the measured flame speeds were also above the laminar flame speed and the temperatures in porous media above the adiabatic flame temperature. However, for rich combustion of natural gas the flame speeds are of the same order as the laminar flame speed and the temperatures in the burner are up to 20% lower than the corresponding adiabatic flame temperature. Measurements of CO and CO_2 were compared to chemical equilibrium composition and showed the same trend when equivalence ratio is changed. However, simulations of a *plug flow* reactor performed with the *Chemkin*® software showed a very slow chemical kinetics for rich combustion, indicating that the residence time of the reactants in the burner is insufficient to reach the chemical equilibrium. The highest production of syngas was obtained in the combustion of ethanol at $\Phi = 2,3$, reaching 29% in mole fraction (11,3% H_2 + 17,7% CO). Based on calculations of heat loss from the porous burner, the highest thermal efficiency was about 80%.

Keywords: Porous burner, Liquid and gaseous fuels, Rich combustion, Syngas production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação esquemática da variação da entalpia sensível dos gases através de uma chama a pressão constante com recirculação de calor (linha cheia), e através de uma chama sem recirculação de calor (linha tracejada) (Catapan, 2007).	6
Figura 2.2 - Desenho esquemático do processo de combustão em meios porosos inertes sendo: u_{ch} – velocidade de chama, q_r – fluxo de calor radiante, q_k - fluxo de calor por condução pelo gás e pelo sólido, q_u – fluxo de calor por convecção, Y_c – fração mássica de combustível, T_g – temperatura dos gases, T_s – temperatura do sólido (obtido de Pereira, 2002).	7
Figura 2.3 - Temperatura de chama adiabática e composição de equilíbrio químico para os produtos da oxidação parcial de etanol em um reator adiabático a pressão constante ($p = 1$ bar, $T_r = 373$ K, $T_{max} = 2289$ K) (Catapan <i>et al.</i> , 2008).	12
Figura 2.4 - Esquema do experimento utilizado por Kaplan e Hall (1995).	16
Figura 2.5 - Esquema do experimento utilizado por Vijaykant e Agrawal (2007).	18
Figura 3.1 - Esquema da bancada experimental para testes com combustíveis gasosos.	21
Figura 3.2 - Esquema do queimador poroso em corte.	24
Figura 3.3 - Espumas cerâmicas utilizadas: a) 40 ppi, b) 10 ppi.	25
Figura 3.4 - Queima do gás de síntese durante um teste de combustão rica em combustível.	26
Figura 3.5 - Esquema da bancada experimental para testes com combustíveis líquidos.	28
Figura 3.6 - Curva de calibração do bico injetor, indicando a vazão mássica de etanol líquido em função do tempo de abertura do bico.	30
Figura 3.7 - Desenho da câmara de mistura em corte.	31
Figura 4.1– Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão pobre de gás natural (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar para metano calculada com GRIMech 3.0 (símbolos sólidos).	37
Figura 4.2 – Comparação entre os diagramas de estabilidade de chama de Pereira (2002), Catapan (2007) e do presente trabalho.	39
Figura 4.3 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão pobre de butano (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar obtida de Frassoldati <i>et al.</i> (2010) (símbolos sólidos).	40
Figura 4.4 - Distribuição de temperatura no centro do meio poroso operando com gás natural na razão de equivalência 0,50.	42
Figura 4.5 - Temperatura de chama adiabática para o gás natural e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.	43
Figura 4.6 - Distribuição de temperatura no centro do meio poroso operando com butano na razão de equivalência 0,60.	44

Figura 4.7 - Temperatura de chama adiabática para o butano e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.....	45
Figura 4.8 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão rica de gás natural (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar para metano calculada com GRIMech 3.0 (símbolos sólidos).	47
Figura 4.9 – Diagrama de estabilidade mostrando os regimes subadiabáticos e superadiabáticos na combustão de metano em meio poroso (adaptado de Vogel e Ellzey, 2005)	48
Figura 4.10 – Volume de controle adotado para o balanço de energia.	49
Figura 4.11 - Perda de calor do queimador (\dot{Q}_{loss}) operando com gás natural para cada ponto estável obtido, a) em valor absoluto e b) em valor percentual. 50	
Figura 4.12 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão rica de butano (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar obtida de Frassoldati <i>et al.</i> (2010) (símbolos sólidos).	51
Figura 4.13 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão rica de etanol (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar obtida de Al-Hamamre e Hararah (2010) (símbolos sólidos).	52
Figura 4.14 – Distribuição de temperatura no centro do meio poroso para combustão rica de gás natural, $\Phi=1,30$	53
Figura 4.15 – Temperatura de chama adiabática para o gás natural e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.....	54
Figura 4.16 – Distribuição de temperatura no centro do meio poroso para combustão rica de butano, $\Phi=1,90$	55
Figura 4.17 - Temperatura de chama adiabática para o butano e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.....	56
Figura 4.18 – Distribuição de temperatura no meio poroso para combustão rica de etanol, $\Phi=2,2$	57
Figura 4.19 – Temperatura teórica e experimental da mistura reagente etanol + ar.....	58
Figura 4.20 - Temperatura de chama adiabática para o etanol e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.....	59
Figura 4.21 – Curva de equilíbrio químico e resultados das medições de composição dos gases de exaustão para combustão rica de gás natural e ar. Porcentagem volumétrica dos produtos em base seca em função da razão de equivalência.....	60
Figura 4.22 – Frações molares para uma mistura de gás natural e ar com $\Phi=1,50$ em um reator <i>plug flow</i> na temperatura de chama adiabática (mecanismo de Marinov <i>et al.</i> , 1998).	62
Figura 4.23 – Frações molares para combustão de gás natural e ar com $\Phi=1,5$ para um reator tipo <i>plug flow</i> de 80 mm de comprimento e perfil de temperatura	

de acordo com as medições realizadas no queimador (mecanismo de Marinov <i>et al.</i> , 1998).....	63
Figura 4.24 – Curva de equilíbrio químico e resultados das medições de composição dos gases de exaustão para combustão de butano e ar. Porcentagem volumétrica dos produtos em base seca em função da razão de equivalência...	65
Figura 4.25 – Frações molares para uma mistura de butano e ar com $\Phi=2,1$ em um reator <i>plug flow</i> na temperatura de chama adiabática (mecanismo de Marinov <i>et al.</i> , 1998).	66
Figura 4.26 – Frações molares para combustão de butano e ar com $\Phi = 2,1$ em um reator tipo <i>plug flow</i> de 80 mm de comprimento e perfil de temperatura de acordo com as medições realizadas no queimador (mecanismo de Marinov <i>et al.</i> , 1998).....	67
Figura 4.27- Curva de equilíbrio químico e resultados das medições de composição dos gases de exaustão para combustão de etanol e ar. Porcentagem volumétrica dos produtos em base seca em função da razão de equivalência...	69
Figura 4.28 – Frações molares para uma mistura de etanol e ar com $\Phi=2,3$ em um reator <i>plug flow</i> na temperatura de chama adiabática (mecanismo de Marinov, 1999)	71
Figura 4.29 – Frações molares para combustão de etanol e ar com $\Phi = 2,3$ em um reator tipo <i>plug flow</i> de 80 mm de comprimento e perfil de temperatura de acordo com as medições realizadas no queimador (mecanismo de Marinov, 1999).....	72
Figura 4.30 – Eficiência térmica do queimador poroso operando com gás natural, butano e etanol.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Limites de inflamabilidade a 25°C e 1 atm (Law, 2006).....	10
Tabela 3.1 - Composição do gás natural utilizado nos testes.....	22
Tabela 3.2 - Espécies químicas medidas pelo analisador de gases utilizado.....	27
Tabela 4.1 - Frações molares para combustão de gás natural e ar, $\Phi = 1,5$	64
Tabela 4.2 - Frações molares para combustão de butano e ar, $\Phi = 2,1$	68
Tabela 4.3 - Frações molares para combustão de etanol, $\Phi = 2,3$	73
Tabela 4.4 - Razão entre a massas de H, C e O e a massa total da mistura reagente.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Alfabeto Latino

A_q	– área da seção transversal do queimador	
D	– diâmetro da câmara de mistura	[m]
D_q	– diâmetro do queimador	[m]
$EQUIL$	– pacote do software <i>Chemkin</i> para cálculos de equilíbrio químico	
h_e	– entalpia da mistura na entrada do volume de controle	[kJ/kg]
H_i	– entalpia inicial	[J]
h_s	– entalpia da mistura na saída do volume de controle	[kJ/kg]
IM	- incerteza de medição	
L	– comprimento do queimador / da câmara de mistura	[m]
LII	– limite inferior de inflamabilidade	
lpm	–litros por minuto [1 lpm = $1,67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$]	
LSI	– limite superior de inflamabilidade	
\dot{m}	– vazão mássica total	[kg/s]
\dot{m}_{ar}	– vazão mássica de ar	[kg/s]
\dot{m}_c	– vazão mássica de combustível	[kg/s]
m_C	– massa de carbono	[kg]
m_H	– massa de hidrogênio	[kg]
m_O	– massa de oxigênio	[kg]
m_{total}	– massa total dos reagentes	[kg]
p	– pressão	[bar]
ppi	– poros por polegada linear	

ppm – partes por milhão [em volume]

PREMIX – pacote do software *Chemkin* para cálculos de chama pré-misturada

PWM – modulação da largura do pulso elétrico

Q_c – energia térmica liberada pela reação de combustão [J]

\dot{Q}_e – fluxo de calor entrando no volume de controle [kW]

q_k – fluxo de calor por condução [W]

\dot{Q}_s – fluxo de calor saindo do volume de controle [kW]

q_r – fluxo de calor radiante [W]

Q_{rec} – energia térmica recirculada [J]

\dot{Q}_{loss} – taxa de perda de calor [kW]

q_u – fluxo de calor por convecção [W]

REC – região de estabilização de chama

RP – região de pré-aquecimento

S_L – velocidade de chama laminar [cm/s]

T – temperatura [°C, K]

T_{ad} – temperatura de chama adiabática [°C, K]

T_g – temperatura da fase gasosa [°C, K]

T_{max} – temperatura máxima do queimador indicada em um dos termopares [°C, K]

T_r – temperatura da mistura reagente [°C, K]

T_s – temperatura da fase sólida [°C, K]

u_{ch} – velocidade de chama no meio poroso [cm/s]

\dot{V}_{ar} – vazão volumétrica de ar [m³/s]

\dot{V}_c – vazão volumétrica de combustível [m³/s]

\dot{V}_r – vazão volumétrica total dos reagentes	[m ³ /s]
x/L – coordenada linear adimensional	[m/m]
Y_c – fração mássica de combustível	[kg/kg]

Alfabeto Grego

ΔH^0 – entalpia da reação	[kJ/kmol]
Φ - razão de equivalência	
η_t - eficiência térmica do queimador	[%]
ρ - massa específica	[kg/m ³]
σ – desvio padrão	

Sub-índices

ad – condição adiabática	
c – relativo ao combustível	
ch – relativo à chama	
e – condições estequiométricas / condição de entrada no volume de controle	
g – relativo à fase gasosa	
i – inicial	
max – valor máximo	
q – queimador	
r – reagentes / radiação	
s – relativo à fase sólida / condição de saída do volume de controle	
v – vapor	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 CONTRIBUIÇÕES PRETENDIDAS	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 FUNDAMENTOS	5
2.1.1 Recirculação de calor em sistemas de combustão	5
2.1.2 Combustão em meios porosos	6
2.1.3 Razão de equivalência	8
2.1.4 Velocidade de chama	8
2.1.5 Limites de inflamabilidade	9
2.1.6 Estabilidade de chama	10
2.1.7 Oxidação parcial	11
2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.2.1 Combustão de combustíveis gasosos em meio poroso....	13
2.2.2 Combustão de combustíveis líquidos em meio poroso...	15
2.2.3 Combustão rica em meio poroso.....	18
3. EXPERIMENTO	21
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTES COM COMBUSTÍVEIS GASOSOS	21
3.1.1 Sistemas de alimentação de ar e gás combustível.....	22
3.1.2 Queimador poroso	23
3.1.3 Sistema de medição da composição dos produtos	27
3.2 BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTES COM COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS	27
3.2.1 Sistemas de alimentação de ar e combustível	28
3.2.2 Câmara de mistura	31
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
4. RESULTADOS	35
4.1 COMBUSTÃO POBRE EM COMBUSTÍVEL ($\Phi < 1$).....	35
4.1.1 Diagramas de estabilidade de chama	35
4.1.1.1 Gás natural	35
4.1.1.2 Butano.....	39
4.1.1.3 Etanol.....	40
4.1.2 Distribuição de temperatura no meio poroso	41
4.1.2.1 Gás natural	41
4.1.2.2 Butano.....	43

4.1.3 Resumo	45
4.1 COMBUSTÃO RICA EM COMBUSTÍVEL ($\Phi > 1$)	46
4.2.1 Diagramas de estabilidade de chama	46
4.2.1.1 Gás natural.....	46
4.2.1.2 Butano	51
4.2.1.3 Etanol.....	52
4.2.2 Distribuição de temperatura no meio poroso.....	53
4.2.2.1 Gás natural.....	53
4.2.2.2 Butano	54
4.2.2.3 Etanol.....	56
4.2.3 Composição dos produtos	59
4.2.3.1 Gás natural.....	59
4.2.3.2 Butano	64
4.2.3.3 Etanol.....	69
4.2.4 Discussões sobre a produção de gás de síntese	73
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	77
5.1 CONCLUSÕES	77
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – Calibração dos medidores de vazão	87
APÊNDICE B – Propagação das incertezas de medições.....	89
APÊNDICE C – Fotos do experimento	93

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A criação de novas regulamentações ambientais cada vez mais restritivas e o aumento do preço dos combustíveis fósseis estimula a busca por fontes de energia renováveis e por equipamentos mais eficientes capazes também de reduzir a emissão de poluentes. Nesse contexto, a utilização da tecnologia de combustão em meios porosos representa uma alternativa promissora em função das vantagens que apresenta quando comparada a sistemas de combustão convencionais.

Os queimadores porosos são caracterizados pela combustão da mistura reagente no interior da estrutura tridimensional de cavidades interconectadas que forma a matriz porosa, alterando as características da chama. A matriz sólida promove o pré-aquecimento da mistura de reagentes através da transferência de calor por condução e radiação. Este pré-aquecimento traz como consequência o aumento da taxa de reação e a elevação da temperatura na zona de reação, resultando no aumento da eficiência de conversão do combustível em produtos saturados da combustão (baixa emissão de poluentes), no aumento da velocidade de chama e na ampliação da faixa de estabilidade (queima de misturas pobres em combustível) (Howell *et al.*, 1996).

O projeto ideal de um queimador poroso é definido pela temperatura e forma da carga que se deseja aquecer, pela potência requerida e faixa de estabilidade necessária, pela intermitência ou continuidade do processo em questão, pela temperatura máxima de operação da matriz porosa, pela resistência mecânica dos materiais empregados, entre outros. Atualmente, queimadores porosos já estão disponíveis comercialmente e podem ser encontrados em processos como secagem de papel, cura de plásticos e revestimentos, aquecimento de água e ambiente, tratamento térmico de metais e cocção de alimentos.

De maneira geral, os queimadores porosos operam com combustíveis gasosos, mas podem operar com combustíveis líquidos também. O uso de combustíveis líquidos como a gasolina, etanol e óleo diesel em qualquer sistema de combustão apresenta vantagens como o fácil manuseio e a existência de uma infra-estrutura bem desenvolvida de extração, refino e distribuição. Se o combustível for renovável, como é o caso do etanol produzido a partir da biomassa, existem vantagens adicionais relacionadas com a redução de emissões, sustentabilidade e segurança energética. Porém, a combustão pré-misturada de combustíveis líquidos é mais difícil porque o líquido precisa ser

primeiro atomizado e evaporado antes de ser misturado homogeneamente com ar. O uso de queimadores porosos para combustão de líquidos facilita a evaporação das gotas do spray devido a recirculação de calor, melhora a mistura dos reagentes no interior do meio poroso, reduz a emissão de CO e NO_x e permite um sistema mais compacto devido à alta densidade de potência (Jugjai *et al.*, 2002).

Kaplan e Hall (1995) explicam que um queimador poroso comercial para combustíveis líquidos poderia ter várias aplicações, como por exemplo: 1) queimadores industriais radiantes para uso em áreas onde o gás natural não é disponível ou onde um combustível líquido é um subproduto de um processo industrial; 2) aquecimento portátil, por exemplo, para navios e 3) incineração de resíduos líquidos nocivos.

Estudos recentes mostram que outra aplicação potencial dos queimadores porosos é a produção de gás de síntese (H₂ + CO) através da oxidação parcial de combustíveis. A oxidação parcial é uma das principais técnicas de produção de hidrogênio, assim como a reforma a vapor e a reforma auto-térmica. A partir do hidrogênio é possível produzir energia elétrica em células a combustível sem emissão de poluentes, tendo apenas calor e água como subprodutos. Apesar de ser um dispositivo com alta eficiência e não poluente, a utilização de células a combustível ainda é limitada por dificuldades de geração, distribuição e armazenamento de hidrogênio. Através da oxidação parcial em queimadores porosos é possível produzir hidrogênio de forma descentralizada a partir de combustíveis que já possuem infra-estrutura de distribuição e armazenamento, o que pode viabilizar o uso das células a combustível.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é estudar características da combustão rica de gás natural, butano e etanol em um queimador poroso visando o desenvolvimento de reatores de oxidação parcial. A combustão pobre também é explorada, mas com o intuito de auxiliar no entendimento dos resultados da combustão rica e de validar o funcionamento da bancada experimental, visto que na literatura estão disponíveis poucos trabalhos de oxidação parcial em meios porosos e diversos trabalhos abordando combustão pobre em queimadores porosos radiantes.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Construir uma bancada experimental para testes de combustão de gases e líquidos em meio poroso;
2. Obter o diagrama de estabilidade de chama para os três combustíveis;
3. Avaliar a distribuição de temperatura no interior do queimador poroso;
4. Medir a composição dos produtos de combustão e comparar com estimativas baseadas em equilíbrio químico e em modelos cinéticos disponíveis;
5. Identificar a condição mais favorável à produção de gás de síntese permitida pelo experimento;
6. Com base nos resultados obtidos e na experiência adquirida, sugerir melhorias no projeto do queimador a fim de otimizar o seu desempenho.

1.3 CONTRIBUIÇÕES PRETENDIDAS

Esta dissertação visa contribuir no desenvolvimento de soluções técnica e economicamente viáveis para produção de gás síntese. Além do uso do hidrogênio em células a combustível, sabe-se que grandes quantidades de H_2 são utilizadas nas indústrias de petróleo e química em processos tais como hidrodessulfurização, hidrocrackeamento e produção de amônia.

O trabalho explora o uso de três combustíveis comuns e comercialmente disponíveis a fim de permitir a produção de gás de síntese nos locais de consumo, que poderiam ser postos de gasolina, refinarias de petróleo, indústrias diversas ou até mesmo em automóveis.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O presente capítulo introdutório contextualizou o tema proposto e apresentou os objetivos e contribuições pretendidas.

O Capítulo 2 traz uma breve descrição de alguns fundamentos da combustão em meios porosos, os quais são essenciais para o entendimento desta dissertação. Em seguida, será apresentada uma revisão da literatura com alguns dos trabalhos mais relevantes ao tema proposto.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição da bancada experimental construída para a realização dos testes. O funcionamento da bancada e o procedimento experimental adotado durante os testes serão explicados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos testes experimentais, sua análise e discussões. O capítulo está dividido em duas seções principais: combustão pobre em combustível e combustão rica em combustível. Serão abordados principalmente a estabilidade de chama de cada combustível, temperaturas medidas no meio poroso e composição dos produtos de combustão.

Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões obtidas ao longo deste trabalho e sugestões para futuras pesquisas sobre tema.

2. FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta definições e conceitos necessários para o entendimento desta dissertação bem como uma revisão dos trabalhos da literatura.

2.1 FUNDAMENTOS

2.1.1 Recirculação de calor em sistemas de combustão

O princípio da recirculação de calor em sistemas de combustão se baseia em utilizar parte da energia térmica presente nos produtos para pré-aquecer os reagentes. Se o pré-aquecimento for realizado sem recorrer à diluição dos reagentes com a recirculação dos produtos, é possível obter temperaturas de chama acima da temperatura de chama adiabática da mistura na condição inicial. Este princípio foi primeiramente analisado por Hardesty e Weinberg (1974) e denominado de combustão com excesso de entalpia. A Figura 2.1 traz uma representação esquemática do princípio da recirculação de calor, mostrando a variação da entalpia dos gases ao atravessar uma chama com pressão constante na qual existe alguma recirculação de calor externa à chama. Na figura, a linha tracejada representa uma chama de deflagração convencional e a linha contínua um sistema com recirculação de calor. Em um sistema de combustão convencional, os reagentes entram com uma entalpia sensível inicial (H_i) e após a liberação da energia química da combustão (Q_c) os gases passam para o nível de entalpia $H_i + Q_c$, que é o limite termodinâmico para a entalpia dos produtos de combustão de um sistema adiabático. Já em um sistema com recirculação de calor, os reagentes recebem a parcela de calor recirculado Q_{rec} e passam para o nível $H_i + Q_{rec}$. Ao passar pela chama, a energia química liberada na combustão (Q_c) eleva a entalpia dos gases para o nível $H_i + Q_{rec} + Q_c$. Em seguida, a parcela Q_{rec} é transferida para os reagentes e a entalpia dos gases é reduzida até o limite termodinâmico do processo. Conforme mostrado no esquema da Figura 2.1, a entalpia dos gases em determinada região do sistema atinge um nível de energia térmica acima do limite termodinâmico. Isto leva a temperaturas e taxas de reação maiores que em sistemas sem recirculação de calor.

Portanto, um sistema com recirculação de calor pode apresentar velocidades de chama maiores que a velocidade de chama laminar e os limites de inflamabilidade da mistura reagente podem ser ampliados.

Além disso, esta estratégia permite também a queima de combustíveis com baixo poder calorífico e a redução da emissão de poluentes como o CO e hidrocarbonetos não queimados.

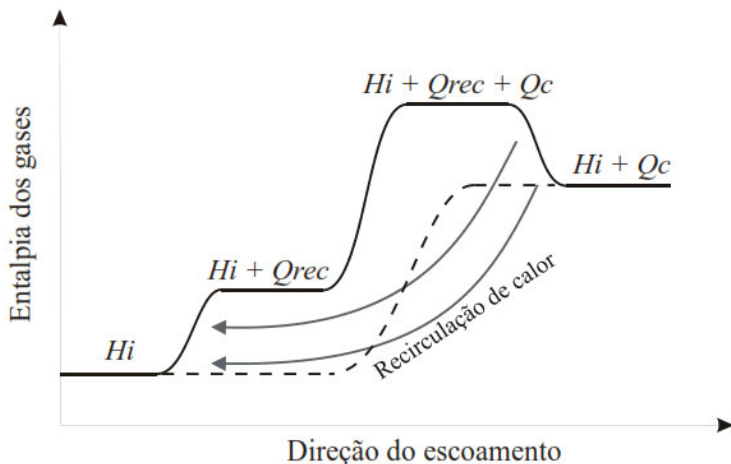


Figura 2.1- Representação esquemática da variação da entalpia sensível dos gases através de uma chama a pressão constante com recirculação de calor (linha cheia), e através de uma chama sem recirculação de calor (linha tracejada) (Catapan, 2007).

2.1.2 Combustão em meios porosos

O conceito da combustão em meios porosos se baseia no uso de uma matriz sólida porosa interposta na zona de combustão para promover a recirculação interna de calor e pré-aquecer os reagentes. A combustão pode acontecer no modo estacionário, com a frente de chama estabilizada no interior do meio poroso, ou no modo transiente, com a frente de chama se deslocando continuamente a favor ou contra o fluxo dos reagentes. Este modo transiente recebe a denominação na literatura de “*filtration combustion*”. O foco do presente trabalho é a combustão estacionária.

A Figura 2.2 obtida de Pereira (2002) auxilia no entendimento do princípio de funcionamento dos queimadores porosos com chama estabilizada. Observa-se no desenho que o meio poroso é dividido em duas seções com propriedades diferentes. A seção à montante, denominada de região de pré-aquecimento (RP), possui poros pequenos para evitar a propagação da chama e forçar a sua estabilização na seção

seguinte que possui poros maiores, denominada de região de estabilização de chama (REC). Quando a chama busca estabilizar-se no interior da RP, ou quando esta move-se da REC para a RP em um evento de retorno de chama, a área interfacial específica (m^2/m^3) entre as fases gás e sólido aumenta em função da diminuição do tamanho de poro. O aumento da área interfacial proporciona uma maior transferência de calor dos gases para o sólido, diminuindo a temperatura da chama e provocando a sua extinção (“*quenching*”). Desta forma, a chama tende a se estabilizar na REC, próxima a interface entre as duas seções (Pereira, 2002), ou sofre extinção na RP por “*quenching*” em episódio de retorno de chama.

A Figura 2.2 mostra uma representação qualitativa dos perfis de temperatura dos gases (T_g) e do sólido (T_s), bem como da fração mássica de combustível (Y_c) ao longo do queimador.

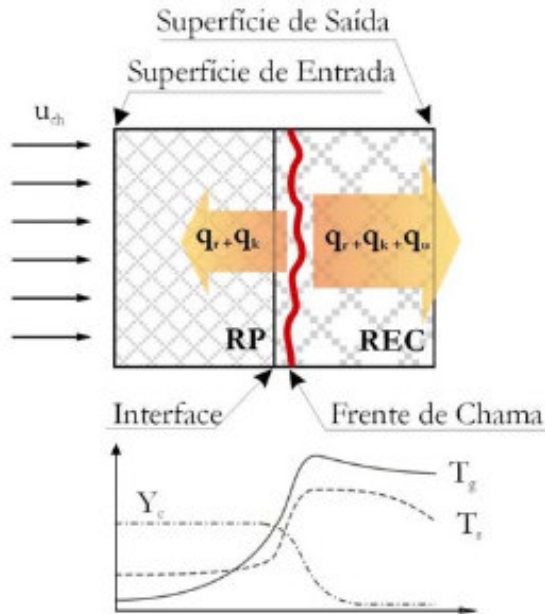


Figura 2.2 - Desenho esquemático do processo de combustão em meios porosos inertes sendo: u_{ch} – velocidade de chama, q_r – fluxo de calor radiante, q_k - fluxo de calor por condução pelo gás e pelo sólido, q_u – fluxo de calor por convecção,

Y_c – fração mássica de combustível, T_g – temperatura dos gases, T_s – temperatura do sólido (obtido de Pereira, 2002).

A estabilização da chama de deflagração pode ser explicada como segue. Os reagentes entram no meio poroso a uma determinada temperatura inicial e são aquecidos pela fase sólida à medida que escoam. A temperatura dos reagentes aumenta até ocorrer a ignição da mistura, formando uma frente de chama na fase gasosa. Nesse ponto, as temperaturas da fase sólida e da fase gasosa são máximas. Após a chama, os produtos quentes da combustão transferem calor por convecção à fase sólida que, por sua vez, transfere calor por condução e radiação para as regiões mais frias antes da chama. Esse processo de transferência de calor da região posterior à chama para a região anterior à chama é uma forma de recirculação de calor, no contexto discutido por Hardesty e Weinberg (1974). Após a frente de chama as temperaturas do sólido e do gás decrescem. A temperatura do gás diminui em função da transferência de calor para o sólido e a temperatura do sólido diminui devido à transferência de calor por radiação para o ambiente externo.

2.1.3 Razão de equivalência

A razão de equivalência (Φ) é o parâmetro utilizado para avaliar a proporção combustível/ar na mistura reagente, conforme

$$\Phi = \frac{\dot{m}_c / \dot{m}_{ar}}{\dot{m}_c / \dot{m}_{ar}|_e} \quad (2.1)$$

onde \dot{m}_c é o fluxo de massa de combustível, \dot{m}_{ar} é o fluxo de massa de ar e o subscrito e representa a condição estequiométrica. Sendo assim, para misturas com $\Phi < 1$ tem-se combustão pobre em combustível e para $\Phi > 1$ tem-se combustão rica em combustível.

2.1.4 Velocidade de chama

Considerando uma chama plana estacionária, a velocidade de chama laminar S_L é definida como a velocidade com que os gases reagentes se movem em direção à onda de combustão (Glassman, 1987). Na combustão pré-misturada em queimadores porosos, assume-se que a

velocidade de chama (u_{ch}) é igual à velocidade média dos reagentes na entrada do meio poroso. Portanto, u_{ch} é calculada através de

$$u_{ch} = \frac{\dot{V}_r}{A_q} \quad (2.2)$$

sendo \dot{V}_r a vazão volumétrica dos reagentes à temperatura de entrada no meio poroso e A_q é a área da seção transversal do queimador. Nota-se que existe um equilíbrio local no interior do poro entre S_L para a mistura reagente e o campo de velocidade da fase gasosa. No entanto, u_{ch} representa uma média macroscópica que não leva em consideração nem os detalhes no nível do poro, nem eventuais distorções na forma macroscópica da frente de chama, como discutido em Catapan (2007).

2.1.5 Limites de inflamabilidade

Misturas de ar e combustível podem ser inflamáveis ou não dependendo da pressão, temperatura e razão de equivalência. O principal fator que determina a inflamabilidade de uma mistura é o balanço entre a taxa de liberação de calor resultante da combustão, que é função da taxa de reação e do poder calorífico do combustível, e a taxa de perda de calor pela chama. Assim, se a mistura for muito pobre ou muito rica em combustível, a taxa de reação torna-se muito baixa e a energia liberada na combustão não é suficiente para compensar a perda de calor da chama. Desse modo, a chama não é capaz de se auto-sustentar e se apaga quando a fonte de ignição é removida (Coelho e Costa, 2007).

A composição crítica que separa misturas inflamáveis e não inflamáveis é chamada de Limite de Inflamabilidade. O Limite Inferior de Inflamabilidade (LII) corresponde à mistura mais pobre em combustível capaz de manter uma chama estável, enquanto que o Limite Superior de Inflamabilidade (LSI) corresponde à mistura mais rica. A Tabela 2.1 apresenta os limites inferiores e superiores de inflamabilidade para alguns combustíveis.

Tabela 2.1 - Limites de inflamabilidade a 25°C e 1 atm (Law, 2006).

Combustível	LII (Φ)	LSI (Φ)
H ₂	0,10	7,14
CO	0,34	6,8
CH ₄	0,50	1,67
C ₃ H ₈	0,56	2,7
C ₄ H ₁₀	0,57	2,8
C ₂ H ₅ OH	0,41	2,8

Em um queimador poroso, os limites de inflamabilidade são afetados pela recirculação de calor. O aumento da temperatura dos reagentes, provocado pela recirculação de calor, amplia os limites de inflamabilidade em função do aumento da taxa de reação. Assim, queimadores porosos possibilitam a queima de misturas mais pobres que o LII e misturas mais ricas que LSI de uma chama livre laminar.

2.1.6 Estabilidade de chama

Em um queimador convencional de chama livre laminar pré-misturada existe apenas uma velocidade de chama correspondente a cada razão de equivalência. Já em um queimador poroso existe uma faixa de velocidades de chama em cada razão de equivalência onde é possível obter uma chama estável.

Para a chama permanecer estável no queimador poroso, a velocidade de propagação da frente de chama no meio poroso deve ser igual à velocidade de escoamento dos reagentes. Quando a velocidade dos reagentes aumenta, em função de um aumento de potência do queimador na mesma razão de equivalência, a frente de chama se move na direção do escoamento até estabilizar em uma nova posição no meio poroso onde as velocidades se igualam novamente. O aumento da velocidade de propagação da frente de chama necessário para equilibrar as velocidades acontece devido ao aumento do pré-aquecimento dos reagentes que aumenta a taxa de reação. Caso o aumento da velocidade de propagação da chama não seja suficiente para que esta se iguale à velocidade dos reagentes, a frente de chama continua se movendo na

direção do escoamento até descolar do meio poroso. Este comportamento é definido pelo limite superior de estabilidade de chama.

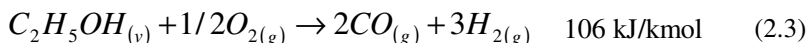
Por outro lado, quando a velocidade dos reagentes diminui, a chama se move na direção contrária ao escoamento e o pré-aquecimento dos reagentes é reduzido, o que faz com que a velocidade de propagação da chama diminua até se equilibrar novamente com a velocidade dos reagentes. Caso a velocidade de propagação da frente de chama continue sendo maior que a velocidade dos reagentes, a frente de chama se desloca à montante até ocorrer o retorno de chama, que representa o limite inferior de estabilidade de chama.

Além dos limites de estabilidade de chama, outros fatores podem restringir a faixa de operação do queimador, como por exemplo, a temperatura máxima suportada pela matriz porosa. Nesse caso, o queimador fica limitado a operar com razões de equivalência mais afastadas da condição estequiométrica.

A estabilidade de chama em um queimador poroso pode ser ainda ampliada com a inclusão de mecanismos adicionais de estabilização de chama, como por exemplo, uma placa de injeção. Posicionada à montante do meio poroso, a placa de injeção é feita de um material isolante e possui um orifício central por onde passa a mistura reagente. O estreitamento do escoamento promovido pelo orifício aumenta a velocidade dos reagentes dificultando o retorno de chama. Nessa configuração de queimador, os reagentes entram no meio poroso na forma de um jato central e a chama tende a assumir um formato cônico, diferentemente do formato aproximadamente plano encontrado em queimadores porosos sem a placa de injeção. No entanto, mesmo com a existência de injeção de reagentes através de uma placa perfurada, a chama pode estabilizar-se em uma forma plana, conforme mostrado por Catapan *et al.* (2011).

2.1.7 Oxidação parcial

A oxidação parcial é uma técnica de produção de gás de síntese que consiste na combustão de uma mistura reagente com excesso de combustível, onde a falta de oxigênio para oxidar totalmente o combustível resulta na produção de CO e H₂. A reação global do processo de oxidação parcial de etanol está representada na Equação (2.3) (Rodrigues *et al.*, 2009).



Em relação às outras técnicas de produção de gás de síntese, a oxidação parcial apresenta algumas vantagens como a rápida resposta à variação de carga, a capacidade de converter hidrocarbonetos leves e pesados e a desnecessidade de adição de água. Além disso, a reação é exotérmica e por isso não depende de uma fonte externa de energia, o que resulta em um reator mais compacto (Al-Hamamre e Al-Zoubi, 2010).

As desvantagens da oxidação parcial estão relacionadas com a formação de fuligem e a cinética lenta para misturas com grande excesso de combustível.

A Figura 2.3 obtida de Catapan *et al.* (2008) apresenta a temperatura de chama adiabática e as frações molares dos produtos da oxidação parcial de etanol em função da razão de equivalência. O cálculo de equilíbrio químico mostra que as frações molares de H_2 e CO crescem quando a mistura se torna rica em combustível. Existe inicialmente um crescimento brusco em torno da condição estequiométrica, seguido de um patamar aproximadamente constante. Para $\Phi < 1,5$ a produção de H_2 é baixa e para $\Phi > 3,0$ a produção de CH_4 cresce fortemente. Portanto, para oxidação parcial de etanol é indicado operar com razões de equivalência entre 1,5 e 3, onde a produção de H_2 varia entre 10% e 27%.

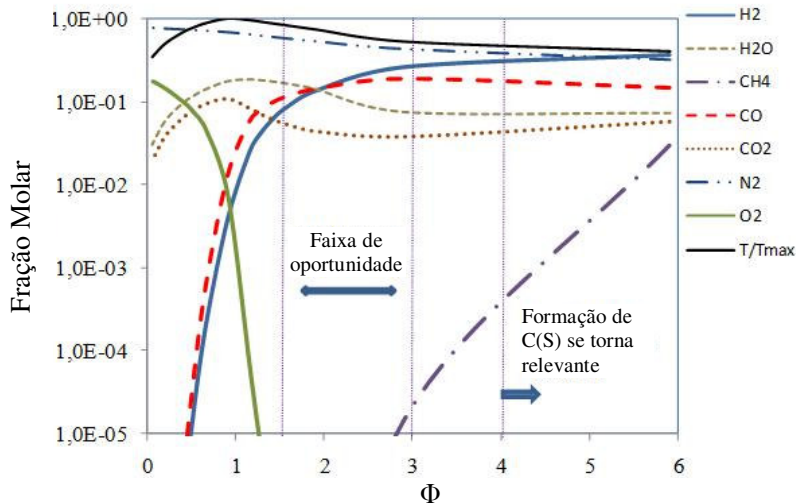


Figura 2.3 - Temperatura de chama adiabática e composição de equilíbrio químico para os produtos da oxidação parcial de etanol em um reator adiabático a pressão constante ($p = 1$ bar, $T_r = 373$ K, $T_{max} = 2289$ K) (Catapan *et al.*, 2008).

2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.1 Combustão de combustíveis gasosos em meio poroso

A combustão de gases em meio poroso tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores nas últimas três décadas, o que resultou em uma grande quantidade de trabalhos publicados sobre o assunto. Foram realizados estudos experimentais e numéricos avaliando diversos aspectos, tais como: emissão de poluentes, eficiência de radiação, limites de estabilidade, temperatura de chama, mecanismos de estabilização de chama, entre outros.

Alguns artigos de revisão podem ser encontrados na literatura, onde grande parte dessas informações está condensada. Podemos citar as revisões realizadas por Howell *et al.* (1996), Wood e Harris (2008), Mujeebu *et al.* (2009a) e Mujeebu *et al.* (2009b).

O trabalho de Wood e Harris (2008) apresenta uma revisão dos trabalhos publicados sobre combustão de metano em meio poroso, focando em aspectos de projeto e operação de queimadores para aplicações práticas em processos de aquecimento. Os autores discorrem sobre o formato e a orientação da câmara de combustão, a possibilidade de operar em altas pressões, a configuração do meio poroso com apenas uma seção ou multi-seções e principalmente sobre a escolha do material utilizado como meio poroso. Os autores concluem que apesar da grande quantidade de trabalhos numéricos e experimentais publicados na área, alguns processos envolvidos na combustão em meio poroso ainda não são bem compreendidos. Isto ocorre devido à dificuldade de realizar medições precisas no interior do meio poroso e também devido à falta de informações confiáveis sobre as propriedades dos materiais utilizados na construção dos queimadores.

Entre os estudos numéricos existentes na literatura podemos citar os trabalhos de Yoshizawa *et al.* (1998), Sathe *et al.* (1990), Hsu e Mathews (1993), Barra *et al.* (2003), Barra e Ellzey (2004), Hayashi *et al.* (2004).

Barra *et al.* (2003) realizaram um estudo numérico sobre a estabilização de chama em um queimador com meio poroso dividido em duas seções, uma RP e uma REC, semelhante à configuração adotada neste trabalho. O modelo indica que os limites de estabilidade são significativamente afetados pelas propriedades da matriz porosa e que para ampliar ao máximo a faixa de estabilidade de chama a RP deve apresentar baixa condutividade térmica, baixo coeficiente de transferência volumétrica de calor e alto coeficiente de extinção. Já a

REC deve apresentar alta condutividade térmica, alto coeficiente de transferência volumétrica de calor e coeficiente de extinção médio.

O processo de recirculação interna de calor que caracteriza os queimadores porosos foi avaliado numericamente no trabalho de Barra e Ellzey (2004). Os resultados mostraram que tanto a condução de calor quanto a radiação são importantes no pré-aquecimento dos reagentes, no entanto, dependendo da razão de equivalência e da velocidade de chama, um dos modos de transferência de calor se torna predominante. Com o aumento da razão de equivalência e da velocidade de chama, a radiação passa a ser o mecanismo dominante na recirculação de calor.

Será visto no capítulo 3 que o queimador utilizado no presente trabalho utiliza uma placa de injeção com um orifício central como mecanismo de estabilização de chama. Hayashi *et al.* (2004) apresentam um estudo numérico em geometria tridimensional de um queimador com uma placa de injeção para evitar retorno de chama, porém esta possui diversos orifícios igualmente espaçados e com diâmetros da ordem de milímetros. Os resultados mostram que a chama tende a se estabilizar no meio poroso, próximo à interface entre o meio poroso e a placa de injeção. No entanto, para baixas potências e razões de equivalência próximas da condição estequiométrica a chama se estabiliza dentro dos orifícios da placa de injeção. O modelo ainda prevê que as temperaturas na superfície da placa de injeção são muito altas e podem danificar o material da mesma.

Entre os estudos experimentais sobre combustão de gases em meio poroso destacam-se: Khanna *et al.* (1994), Ellzey e Goel (1995), Trimis e Durst (1996), Mital *et al.* (1997), Pereira (2002) e Catapan *et al.* (2011). Destes, Mital *et al.* (1997), Pereira (2002) e Catapan *et al.* (2011) estudaram queima de metano e ar com características semelhantes a este trabalho.

Mital *et al.* (1997) realizaram medições de temperatura e concentração de espécies químicas em uma chama de metano e ar estabilizada em um queimador poroso de duas seções. O queimador apresentou eficiência de radiação entre 20% e 30%, dependendo da razão de equivalência e da potência. As emissões de CO e HC foram relativamente baixas (CO: 0,1 – 3,6 g/kg; HC: 0,1 – 1,2 g/kg) e diminuem com a redução da razão de equivalência. As emissões de NO_x foram muito baixas (0,1 – 0,35 g/kg) e também diminuem com a redução da razão de equivalência, mas aumentam com o aumento da potência do queimador.

Pereira (2002) testou um queimador com duas camadas de meio poroso, sendo a RP com 45 ppi e a REC com 10 ppi. O autor obteve o

diagrama de estabilidade do queimador operando com metano e realizou medições de temperatura com termopares inseridos no interior do meio poroso. Os resultados mostraram temperaturas acima da temperatura de chama adiabática, velocidades de chama de duas a cinco vezes maiores que a velocidade de chama laminar correspondente e ampliação do limite inferior de inflamabilidade em 20%, atingindo $\Phi=0,4$.

Catapan *et al.* (2011) avaliou o uso de uma placa de injeção como um mecanismo adicional de estabilização de chama para o queimador operando em ambiente aberto e em ambiente aquecido (interior de uma fornalha). Medições de temperatura no interior do meio poroso mostraram a existência de três regimes de chama. Para baixas velocidades de escoamento dos reagentes e temperatura ambiente identifica-se uma chama com formato cônico estabilizada perto da placa de injeção. Com o queimador em ambiente aquecido, o aumento da velocidade de escoamento faz a chama passar por uma transição e estabilizar-se na interface entre a RP e a REC assumindo um formato plano. Para velocidades de escoamento ainda maiores a chama estabiliza-se próxima à superfície de saída do queimador, mantendo um formato plano. Os diagramas de estabilidade de chama obtidos para operação em ambiente aberto e em ambiente aquecido apresentaram o mesmo LII e pequenas diferenças nos limites de estabilidade de chama.

2.2.2 Combustão de combustíveis líquidos em meio poroso

Diversos autores afirmam que o uso de queimadores porosos para a combustão de combustíveis líquidos é uma estratégia promissora em função das vantagens que eles apresentam quando comparados a queimadores convencionais de chama livre (Kaplan e Hall, 1995; Jugjai *et al.*, 2002; Fuse *et al.*, 2005; Vijaykant e Agrawal, 2007). A presença da matriz sólida e a recirculação de calor promovem uma melhor evaporação das gotas de líquido, facilitando a mistura do combustível com o ar. Além disso, a mistura entre o ar e o combustível é também obtida em uma distância menor em função do caminho tortuoso que os reagentes percorrem no interior do meio poroso.

A combustão de líquidos em meio poroso apresenta ainda a vantagem de reduzir as emissões de CO, HC e de NO_x. Kaplan e Hall (1995) explicam que as emissões de CO e de HC são reduzidas em função da maior eficiência de combustão promovida pelo pré-aquecimento dos reagentes e pela melhora na mistura dos reagentes, e também em função do aumento do tempo de residência dos gases de exaustão em uma região de alta temperatura, a região de pós-combustão

do meio poroso. Já a redução de NO_x acontece porque a chama pré-misturada do queimador poroso pode ocorrer em baixas razões de equivalência, onde a temperatura da chama é menor do que nas chamas não pré-misturadas dos queimadores convencionais.

Kaplan e Hall (1995) investigaram a combustão de heptano líquido utilizando diferentes configurações de queimador poroso. Foram testados meios porosos feitos dos seguintes materiais: zircônia estabilizada com magnésio, zircônia estabilizada com ítrio e carbeto de silício. A injeção do combustível foi feita usando um bico injetor com vazão fixa de aproximadamente 0,025 lpm, injetando o combustível diretamente na face de entrada do meio poroso, como mostra a Figura 2.4. A razão de equivalência é alterada pela variação da vazão de ar, acarretando variação da vazão total. Combustão completa e estável foi atingida para o heptano em razões de equivalência entre 0,57 e 0,67. As emissões de CO e NO_x , corrigidas para 3% de oxigênio, resultaram em quantidades entre 3 e 7 ppm de CO e entre 15 e 20 ppm de NO_x . Os autores descrevem que a distância entre o bico injetor e o meio poroso foi um parâmetro crítico para manter uma combustão estável. Com o bico injetor muito próximo do meio poroso, a evaporação do combustível e a mistura com o ar se tornam insuficientes.

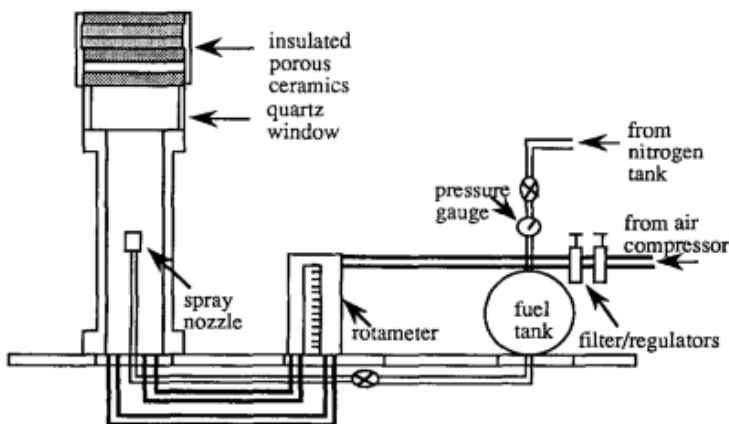


Figura 2.4 - Esquema do experimento utilizado por Kaplan e Hall (1995).

Jugjai *et al.* (2002) desenvolveram um queimador poroso para combustão de querosene sem a necessidade de usar um spray atomizador. O querosene é alimentado gota a gota na superfície superior

do queimador poroso e queimado na parte inferior onde o ar de combustão é injetado pela lateral e misturado com o vapor de querosene. Os produtos de combustão saem pela superfície inferior do queimador. Combustão estável com baixa emissão de poluentes foi obtida para razões de equivalência entre 0,37 e 0,55 e potências entre 2,62 e 3,49 kW.

Fuse *et al.* (2005) propuseram um sistema de ignição equipado com um oscilador ultra-sônico de 1,7 MHz para iniciar a combustão em um queimador poroso. Depois da ignição, a combustão se sustenta devido à recirculação de calor. O combustível fica armazenado em forma de reservatório com superfície livre aquecida pelo meio poroso e o ar é injetado lateralmente no meio poroso, garantindo uma combustão parcialmente pré-misturada. Combustão estável de etanol foi obtida para razões de equivalência entre 0,63 e 0,80. No entanto, a concentração de NO_x foi comparativamente alta, 59-97 ppm.

Vijaykant e Agrawal (2007) estudaram a combustão de querosene em meio poroso inerte feito de SiC com o objetivo de diminuir a emissão de CO, NO_x e fuligem. Diferentes configurações de meio poroso foram testadas agrupando quatro, cinco ou seis cerâmicas de 2,54 cm de espessura e tamanho de poro de 10 ppi, 30 ppi e 66 ppi. A configuração que apresentou a menor emissão de poluentes consiste em um meio poroso de cinco camadas (comprimento total de 12,7 cm) com tamanhos de poro de 10, 30, 10, 10, 30 ppi, nessa seqüência. Foram testadas razões de equivalência entre 0,63 e 0,75 e velocidades de chama entre 5 e 26 cm/s. O bico injetor fornece uma vazão de combustível constante e a razão de equivalência e a velocidade de chama são alteradas através da variação da vazão de ar. Um esquema do experimento é apresentado na Figura 2.5.

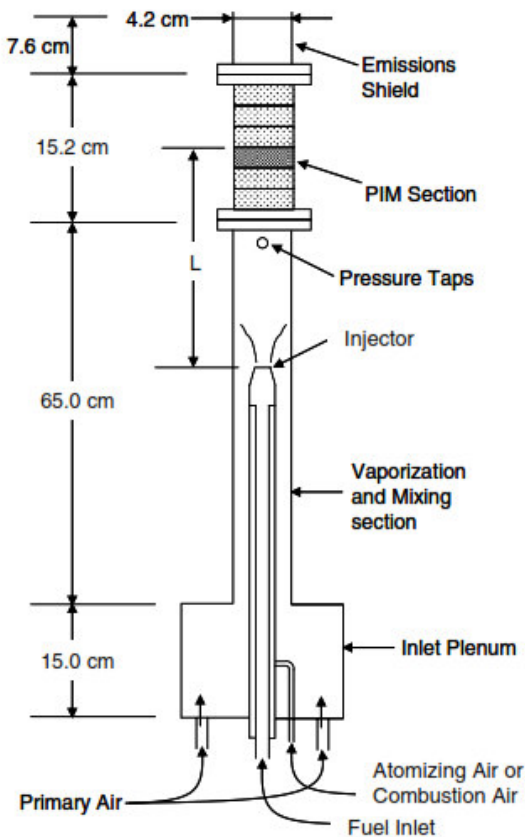


Figura 2.5 - Esquema do experimento utilizado por Vijaykant e Agrawal (2007).

Em todos estes trabalhos não houve qualquer utilização de um meio adicional de evaporação do combustível.

2.2.3 Combustão rica em meio poroso

Motivados pelas vantagens da tecnologia da combustão em meio poroso, estudos recentes mostram que queimadores porosos podem ser usados na oxidação parcial de combustíveis para produção de gás de síntese. A oxidação parcial pode ser realizada em reatores de meio poroso inerte ou catalítico. O processo em meio inerte produz menor quantidade de hidrogênio e apresenta uma tendência à formação de

fuligem (Al-Hamamre *et al.*, 2009). Por outro lado, o meio catalítico tem problemas de desativação do catalisador ao longo do tempo, que pode ocorrer por sinterização causada por excesso de temperatura e por bloqueio de poros e envenenamento causado principalmente pela formação de coque.

Os trabalhos experimentais sobre oxidação parcial catalítica disponíveis na literatura encontram-se em um estágio de bancada para estudo de cinética química. São, em geral, realizados em micro-reatores que consistem basicamente em um tubo com diâmetro interno da ordem de milímetros preenchido com algumas dezenas de miligramas de catalisador. Uma mistura diluída de combustível e oxigênio é injetada com alta velocidade no reator, resultando em uma condição aproximadamente isotérmica e controlada pela cinética química de superfície (Catapan *et al.*, 2008). Estes reatores são usados para determinar a atividade do catalisador, a seletividade para espécies químicas e a obtenção de dados de cinética. Como exemplo de estudos em micro-reatores catalíticos podemos citar os trabalhos de Segal *et al.* (2003), Wanat *et al.* (2005), Salge *et al.* (2005), Costa *et al.* (2008), Hsu *et al.* (2008) e Rodrigues *et al.* (2009).

Já nos trabalhos sobre oxidação parcial em meio poroso inerte utilizam-se reatores porosos de maior escala, com o meio poroso formado por um conjunto de esferas, cilindros ou espumas cerâmicas. Estes estudos visam principalmente o desenvolvimento de equipamentos para geração de gás de síntese. O presente trabalho aborda apenas a oxidação parcial em reatores de meio poroso inerte.

Um reator de meio poroso inerte formado por lamelas de Al_2O_3 foi usado por Al-Hamamre *et al.* (2009) para estudar a produção de hidrogênio através da oxidação parcial de metano. O reator possui 400 mm de comprimento e o tempo de residência varia de 0,29 s em 30 kW até 2,45 s em 3 kW. Amostras do gás de síntese produzido foram coletadas e enviadas para um analisador de gases capaz de medir as espécies químicas H_2 , CO , CO_2 , O_2 , CH_4 e C_2H_2 . As medições de H_2 e CO indicaram sempre quantidades abaixo do equilíbrio químico. Para $\Phi=2,1$ e temperatura de pré-aquecimento dos reagentes de 700°C , foram medidas quantidades de H_2 e CO em torno de 19% e 12% em volume, respectivamente. Os autores avaliaram a influência da temperatura de pré-aquecimento do ar na produção de hidrogênio, mas esta não influenciou significativamente.

Combustíveis líquidos também foram testados para a produção de gás de síntese. Pedersen-Mjaanes *et al.* (2005) avaliaram a combustão rica de metanol, metano, octano e gasolina automotiva em reatores de

meio poroso inerte para produção de hidrogênio. O trabalho relata uma ampla faixa de combustão estável de metanol em meio poroso formado de esferas de alumina. Foi observado um limite superior de inflamabilidade acima do limite convencional, obtendo chamas estáveis com uma razão de equivalência de até 9,3. Na combustão de metanol, a máxima quantidade de H_2 obtida foi de aproximadamente 40% em volume e ocorreu em $\Phi=7,5$. Já na combustão de metano, as medições de H_2 e CO indicaram uma produção máxima de 13% e 11%, respectivamente, na razão de equivalência 1,85. Segundo estes autores, os resultados obtidos mostram que a combustão rica em meios porosos pode ser uma alternativa viável para a produção de gás de síntese.

Pastore e Mastorakos (2011) examinaram a produção de gás de síntese através da combustão rica de combustíveis líquidos em um queimador poroso de duas seções e comprimento total de 200 mm. Na combustão de n-heptano os resultados das medições de H_2 e CO indicam valores crescentes com o aumento da razão de equivalência até $\Phi=2,0$. Acima de $\Phi=2,0$ os resultados das medições não se alteram mais e permanecem em aproximadamente 15% até $\Phi=3,0$, tanto para o H_2 quanto para o CO. A combustão rica de óleo diesel também foi testada e apresentou um pico de aproximadamente 15% de H_2 e 18% de CO na razão de equivalência 2,5. A potência foi mantida constante em 7 kW para todos os testes e a temperatura de pré-aquecimento dos reagentes variou de acordo com o combustível.

Até onde se pôde observar, não há na literatura um estudo sistemático da oxidação parcial de butano ou de etanol com chama estável em meio poroso, o que evidencia a importância das contribuições do presente trabalho.

3. EXPERIMENTO

Este capítulo apresenta uma descrição da bancada experimental construída para a realização dos testes de combustão de gás natural, butano e etanol em um queimador poroso. Os experimentos foram realizados no LabCET – Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos da UFSC.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTES COM COMBUSTÍVEIS GASOSOS

A Figura 3.1 mostra um esquema da bancada construída para testes com combustíveis gasosos. Essa configuração foi utilizada nos testes com gás natural e butano. A bancada experimental inclui sistemas de alimentação de ar e combustível, o queimador poroso, o sistema de medição da composição dos produtos e outros periféricos. A seguir, os sistemas que compõem a bancada serão descritos individualmente.

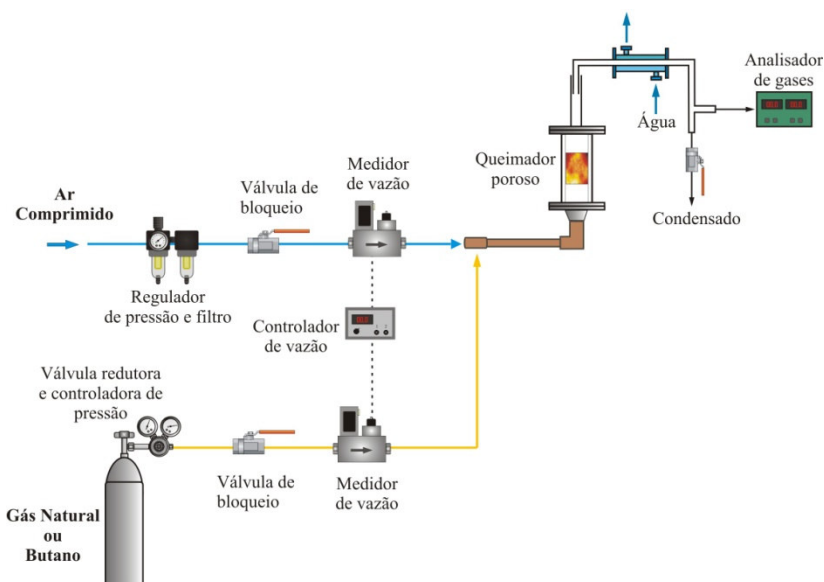


Figura 3.1 - Esquema da bancada experimental para testes com combustíveis gasosos.

3.1.1 Sistemas de alimentação de ar e gás combustível

O gás natural utilizado nos testes provém de cilindros com gás natural veicular comprimido a 200 bar. A composição aproximada, de acordo com a companhia distribuidora SCGÁS, está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição do gás natural utilizado nos testes.

Componente	Fração Volumétrica [%]
CH ₄	88,97
C ₂ H ₆	5,92
C ₃ H ₈	1,91
C ₄ H ₁₀	1,09
N ₂	0,89
CO ₂	1,21
O ₂	0,01

O gás butano utilizado nos testes foi adquirido em cilindros da empresa Liquigás e possui 95% de pureza.

Junto ao cilindro de combustível utiliza-se uma válvula redutora e controladora de pressão que mantém a pressão de saída do gás constante. A medição de vazão é feita por um medidor Omega FMA 770A com princípio térmico de medição e faixa de 0 a 10 lpm. Um controlador eletrônico Omega FMA78P2 conectado ao medidor permite controlar e manter constante a vazão desejada. A linha de combustível possui ainda uma válvula de bloqueio que permite interromper o fluxo de gás imediatamente.

O ar de combustão provém de uma linha de ar comprimido com 10 bar de pressão. A pressão do ar é reduzida para 2 bar através de uma válvula reguladora de pressão que possui um filtro para reter óleo, particulados e umidade. A medição de vazão é feita por um medidor Omega FMA 775A com faixa de medição de 0 a 200 lpm. O mesmo controlador eletrônico utilizado para controle da vazão de gás também é utilizado para controlar a vazão de ar.

O ar de combustão escoar no interior de um tubo de PVC de 25 mm de diâmetro e 650 mm de comprimento (L/D=26). O gás é então

injetado em direção normal ao escoamento de ar e a homogeneização ocorre antes da mistura chegar ao queimador.

Os medidores de vazão de ar e gás foram calibrados a partir de dois sistemas de medição tomados como referência. O medidor de ar foi calibrado a partir de um gasômetro e apresentou uma incerteza de medição de $\pm 0,7$ lpm na faixa de medição utilizada no experimento, que vai de 0 a 50 lpm. Já o medidor de gás foi calibrado a partir de um bolhômetro e apresentou uma incerteza de medição de $\pm 0,1$ lpm na faixa de medição de 0 a 10 lpm. As curvas de calibração dos medidores estão apresentadas no Apêndice A.

O Apêndice B apresenta a análise da propagação dessas incertezas de medição sobre os valores da razão de equivalência e da velocidade de chama.

3.1.2 Queimador poroso

O queimador poroso mostrado no esquema da Figura 3.2 é montado no interior de um tubo de aço inox de 110 mm de diâmetro interno, 300 mm de comprimento e 2 mm de espessura de parede.

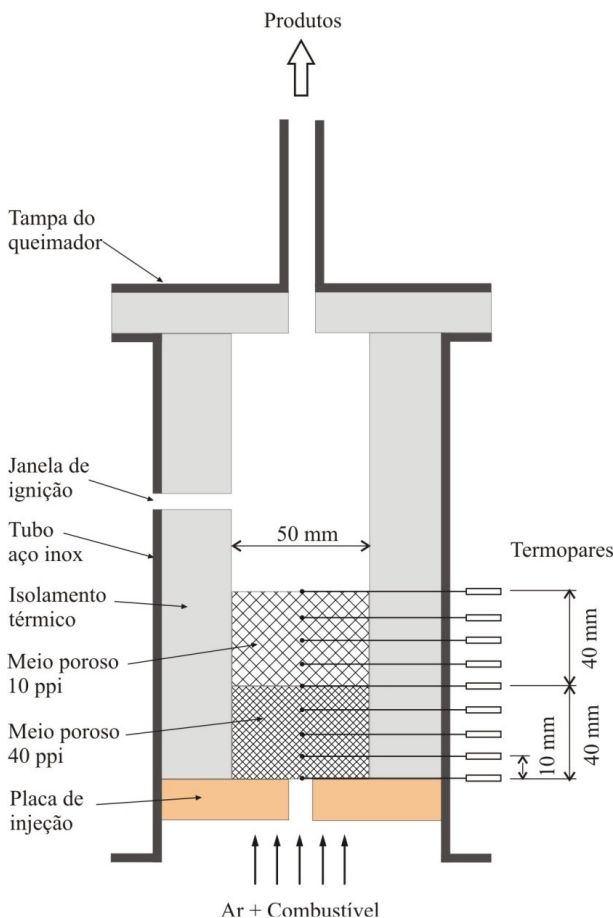


Figura 3.2 - Esquema do queimador poroso em corte.

O meio poroso é formado por quatro espumas de 20 mm de espessura e 50 mm de diâmetro, feitas de Al_2O_3 e ZrO_2 . A região de pré-aquecimento (RP) é composta por duas espumas com densidade linear de poros de 40 ppi (pores per inch) e a região de estabilização de chama (REC) por duas espumas de 10 ppi. Essa configuração de meio poroso foi adotada com base na experiência de trabalhos anteriores realizados no mesmo laboratório (Pereira, 2002; Catapan, 2007).

As espumas cerâmicas utilizadas neste trabalho são mostradas na Figura 3.3. A temperatura máxima suportada pelo material das espumas é de 1550°C. Esse limite de temperatura restringe a faixa de operação do

queimador a razões de equivalência nas quais a temperatura de chama no meio poroso não ultrapassa 1550°C.

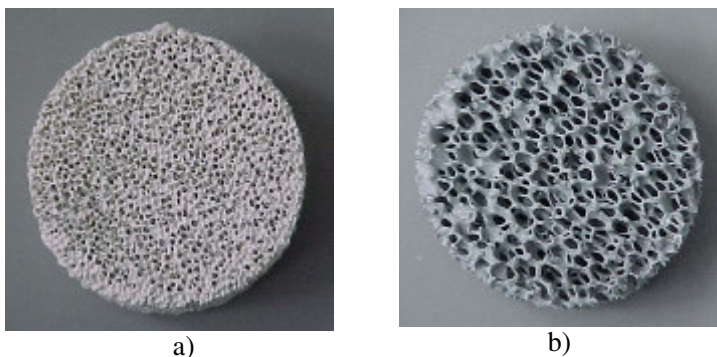


Figura 3.3 - Espumas cerâmicas utilizadas: a) 40 ppi, b) 10 ppi

Entre o meio poroso e o tubo de aço é colocado uma manta composta de fibras de alumina e sílica utilizada como isolamento térmico e também como vedação para evitar que os gases escoem por fora do meio poroso. À montante do meio poroso é colocada uma placa de injeção com um orifício central de 10 mm de diâmetro que serve como mecanismo de estabilização de chama, conforme explicado por Catapan *et al.* (2011). O material da placa de injeção ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) possui um limite de temperatura máxima de uso contínuo de 1200°C. Dependendo do ponto de operação do queimador, a chama pode se estabilizar muito próxima da placa de injeção e as temperaturas nessa região podem alcançar o limite de 1200 °C. Nesse caso o teste deve ser interrompido para evitar a degradação do material da placa.

Nove termopares tipo R (Pt / PT-13%Rh) posicionados a cada 10 mm medem a distribuição de temperatura ao longo do eixo central do queimador. Os fios dos termopares são isolados por tubos cerâmicos de 2 mm de diâmetro com dois orifícios passantes que deixam exposta apenas a junta de medição. Os sinais dos termopares são processados em um sistema de aquisição de dados (*Agilent – 34970A*) e as temperaturas são monitoradas e registradas em um computador através do software *HP BenchLink Data Logger*, versão 3.1. No interior do meio poroso, as temperaturas da fase sólida e da fase gasosa podem ser diferentes e o termopar não é capaz de distinguir a temperatura de cada fase. Portanto, a leitura do termopar deve ser entendida como uma média entre as

temperaturas do sólido e do gás naquela posição. As medições de temperatura têm a função principal de indicar a posição da chama e indicar se o ponto de operação é estável, como será explicado na seção sobre operação do queimador.

O queimador possui uma janela por onde é dada a ignição utilizando uma chama piloto. Após a ignição ter sido efetuada, a janela é fechada com uma bucha feita de material isolante.

Observa-se na Figura 3.2 que a saída do queimador é fechada com uma tampa e a exaustão dos produtos acontece por um tubo de 20 mm de diâmetro localizado em seu centro. Essa é uma medida de segurança, tendo em vista que o queimador também é utilizado em testes de combustão rica em combustível, que resulta na produção de um gás de síntese que pode conter espécies químicas inflamáveis e tóxicas como H_2 e CO . Com o queimador fechado é possível direcionar o gás síntese produzido para uma pós-queima, que acontece em uma chama estabilizada na saída do tubo de exaustão. A Figura 3.4 mostra a queima do gás de síntese durante um teste de combustão rica em combustível.



Figura 3.4 - Queima do gás de síntese durante um teste de combustão rica em combustível.

3.1.3 Sistema de medição da composição dos produtos

Para medir a composição dos produtos de combustão foi utilizado um analisador de gases *Motorscan EuroGas 8020* capaz de medir as espécies químicas apresentadas na Tabela 3.2.

A coleta dos gases é feita por uma sonda refrigerada posicionada na saída do tubo de exaustão do queimador. No momento que a sonda é posicionada, todo o gás do queimador escoar por dentro da sonda e em seguida por uma mangueira até chegar ao analisador de gases. A sonda refrigerada tem a função de reduzir a temperatura dos gases para evitar danos no analisador de gases, condensar e remover a água e congelar as reações químicas.

Tabela 3.2 - Espécies químicas medidas pelo analisador de gases utilizado.

Espécie química	Método de medição	Faixa de medição	Unidade	Incerteza de medição
CO	Infravermelho	0 – 14,00	% vol	± 0,06% vol
CO ₂	Infravermelho	0 – 18,00	% vol	± 0,5% vol
O ₂	Célula eletroquímica	0 – 25,00	% vol	± 0,1% vol

3.2 BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTES COM COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

A bancada experimental construída foi adaptada para permitir testes de combustão de etanol. A principal diferença da combustão pré-misturada de combustíveis líquidos é a necessidade de evaporar o combustível para poder garantir uma mistura homogênea com o ar. Por isso, foi necessário desenvolver uma nova câmara de mistura e alterar os sistemas de alimentação de ar e combustível. O queimador poroso e o sistema de medição da composição dos produtos permaneceram inalterados.

Diversas configurações foram testadas na busca por um sistema capaz de promover a evaporação completa do etanol e criar uma mistura reagente adequada. Outro requisito necessário para o sistema de alimentação de combustível é a capacidade de manter a pressão da linha constante e fornecer uma vazão sem flutuações. Os principais

parâmetros avaliados durante o projeto da nova configuração foram: temperatura de pré-aquecimento do ar, temperatura de pré-aquecimento do etanol, diferentes formas de aquecimento do etanol, diferentes tipos de bico injetor, pressão do etanol no bico injetor e diferentes configurações de câmara de mistura.

A atual configuração da bancada experimental, mostrada na Figura 3.5, apresentou um bom desempenho na evaporação e no controle da vazão de etanol, conforme mostrado na seção sobre resultados. A seguir, a câmara de mistura e os sistemas de alimentação de ar e combustível desenvolvidos são descritos individualmente e, ao final, o procedimento experimental é apresentado.

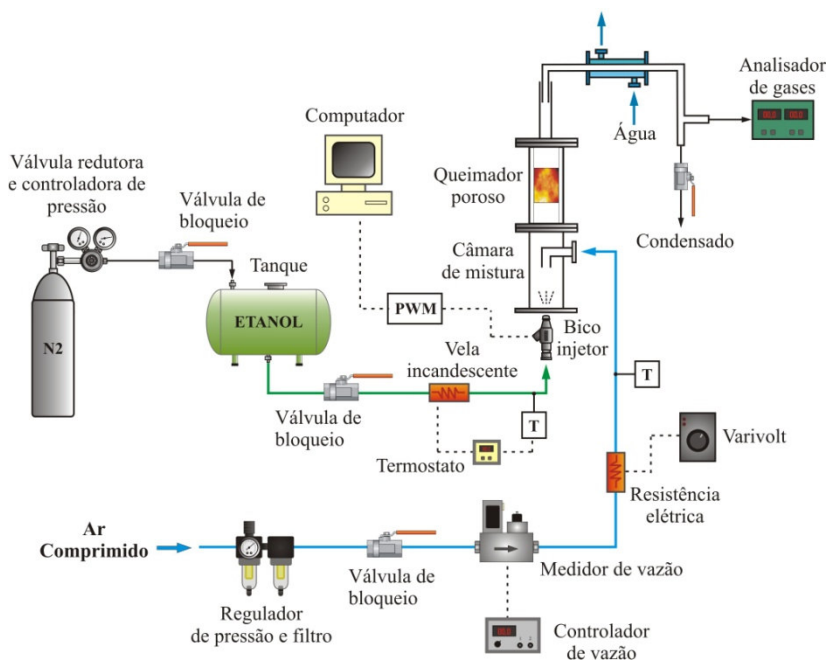


Figura 3.5 - Esquema da bancada experimental para testes com combustíveis líquidos.

3.2.1 Sistemas de alimentação de ar e combustível

O etanol é armazenado em um tanque de aço inox com capacidade para aproximadamente 5 litros. O etanol usado nos testes é da marca *Synth* e possui 99,5% de pureza. Nitrogênio com 95% de

pureza proveniente de um cilindro é utilizado para pressurizar o tanque a 3,5 bar. A pressão do reservatório é controlada por uma válvula redutora e controladora de pressão localizada junto à válvula de abertura do cilindro de nitrogênio. Na superfície superior do tanque de etanol, além da entrada de nitrogênio, existe uma abertura com tampa que permite a realimentação do etanol bem como uma válvula de alívio utilizada como dispositivo de segurança contra uma eventual sobrepressão. Etanol pressurizado escoar através de uma tubulação de aço inox com diâmetro de $\frac{1}{4}$ de polegada conectada ao fundo do tanque. O etanol é então aquecido a 80°C por uma vela incandescente automotiva ligada em uma fonte de tensão *Corsair* 12V e potência de 360W. A temperatura do etanol é mantida constante através de um termostato digital que inclui um termopar tipo K. O termostato atua na vela incandescente ligando e desligando a sua fonte de tensão dependendo da indicação do termopar.

Etanol a 3,5 bar e 80°C é atomizado através de um bico injetor automotivo, instalado na parede inferior (tampa) da câmara de mistura. O bico injetor é acionado através de um circuito eletrônico PWM (*Pulse Width Modulation*) controlado por computador através de uma interface em *LabView*. Esse circuito eletrônico é alimentado por uma fonte estabilizada de tensão contínua (FET 302, marca Eletroteste) e gera um sinal de saída pulsante com a forma de onda quadrada, que é entregue ao bico injetor, provocando a abertura do mesmo cada vez que recebe um pulso. Assim, o tamanho de cada pulso determina o tempo de abertura do bico injetor e conseqüentemente a vazão de etanol.

A vazão do bico injetor foi calibrada através do método gravimétrico, utilizando uma balança *Kern* EW220-3NM com faixa de medição de 0,02 a 220 gramas. O procedimento de calibração consiste basicamente em ajustar uma onda quadrada com determinado tempo de abertura do bico injetor e medir a massa de etanol entregue em 1 minuto. Em seguida ajusta-se a onda quadrada para outro tempo de abertura do bico injetor e mede-se novamente a massa de etanol. A contagem do tempo é feita com próprio *LabView* que desliga automaticamente o bico injetor quando este atinge 1 minuto de funcionamento (ou outro período de tempo programado). A calibração do bico injetor indica um comportamento linear da vazão de etanol em função do tempo de abertura, conforme mostrado Figura 3.6. No gráfico, o tempo de abertura do bico injetor é apresentado em função da variável *duty cycle*, que representa a proporção de tempo durante o qual o bico injetor está aberto. Os pontos mostrados representam a média de três repetições e o máximo desvio padrão encontrado foi $\sigma = 0,50$ g/min.

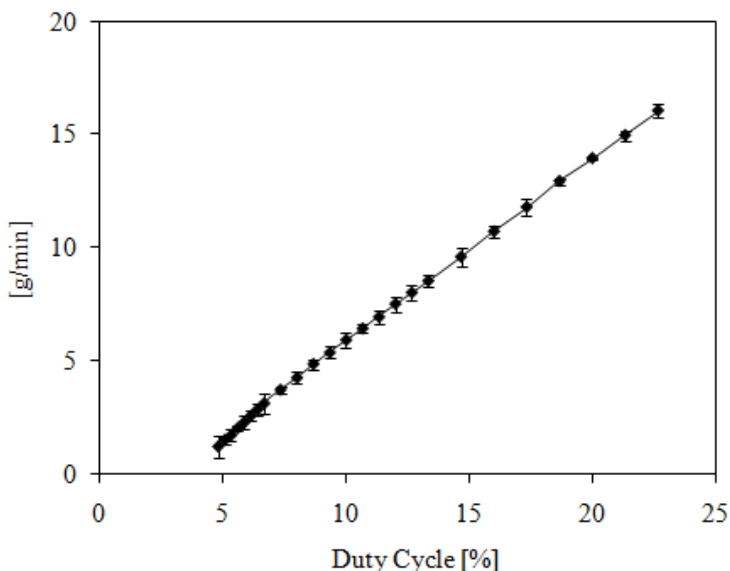


Figura 3.6 - Curva de calibração do bico injetor, indicando a vazão mássica de etanol líquido em função do tempo de abertura do bico.

O sistema de alimentação de ar permanece o mesmo, com exceção de uma resistência elétrica que foi incluída para aquecer o ar antes de ser injetado na câmara de mistura. Durante os testes a temperatura do ar foi mantida em 400 °C, monitorada por um termopar tipo K. A resistência elétrica é acionada por um varivolt que pode fornecer uma tensão desde 0 até 240 V. Dependendo da vazão de ar, ajusta-se manualmente no varivolt uma tensão suficiente para manter a temperatura do ar em 400 °C.

A análise da propagação das incertezas de medição da vazão de ar e etanol sobre os valores da razão de equivalência e da velocidade de chama estão apresentados no Apêndice B.

De maneira geral, os trabalhos sobre combustão de líquidos em meio poroso empregam um bico injetor com vazão de combustível fixa. Nesse caso, a razão de equivalência é alterada variando a vazão de ar, e com isso, a velocidade de chama acaba sendo alterada ao mesmo tempo. O sistema desenvolvido neste trabalho permite medir e controlar tanto a vazão de ar quanto a vazão de etanol, o que possibilita varrer uma faixa mais ampla de razão de equivalência e de velocidade de chama, além de

permitir que esses dois parâmetros sejam analisados separadamente. O desenvolvimento desse sistema representa uma importante contribuição do presente trabalho.

3.2.2 Câmara de mistura

A câmara de mistura, mostrada no desenho da Figura 3.7, consiste em um tubo de aço inox com diâmetro interno de 85 mm e um comprimento de 500 mm, resultando em um volume de mistura de 2,84 litros. Para facilitar a montagem e a construção, a câmara foi dividida em duas partes de 250 mm de comprimento que são unidas por meio de um flange. As paredes são isoladas termicamente pelo lado externo com manta de fibras de alumina e sílica. No flange inferior da câmara é parafusada uma tampa que possui uma abertura central onde é posicionado o bico injetor. O flange superior é utilizado para fixar a câmara de mistura no queimador poroso.

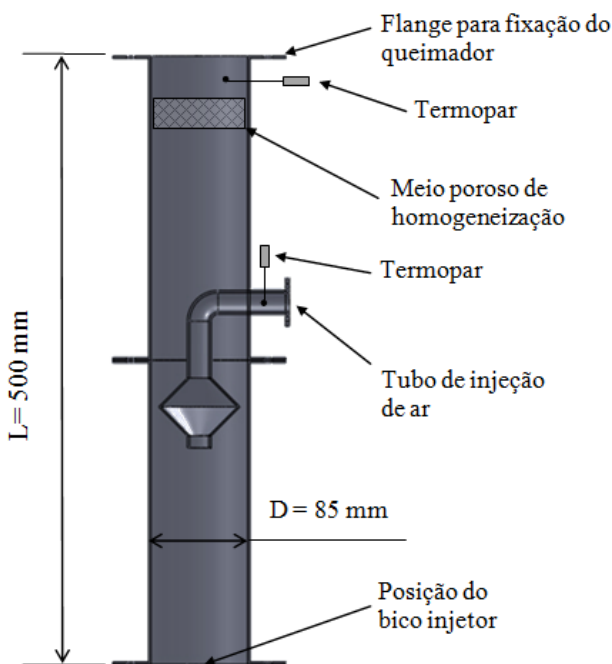


Figura 3.7 - Desenho da câmara de mistura em corte.

No interior da câmara o ar e o etanol são injetados em contracorrente a fim de aumentar a taxa de evaporação das gotículas de etanol e promover uma boa mistura entre os reagentes. Um detalhe construtivo que contribui significativamente para o aumento da taxa de evaporação é a porção final do tubo de injeção de ar que possui um grande volume para dificultar a passagem das gotículas. O tubo de injeção de ar permanece sempre aquecido devido ao escoamento de ar quente em seu interior. Sendo assim, as gotículas de etanol que não evaporam no contato com o jato de ar quente, acabam evaporando ao entrar em contato com a superfície quente do tubo de injeção de ar. O material utilizado na fabricação do tubo de injeção de ar foi o aço inox, com exceção de sua porção final que foi fabricada em alumínio para aumentar a condução de calor.

No final da câmara de mistura uma camada de meio poroso cerâmico de 10 ppi e espessura de 20 mm é utilizada para homogeneizar o perfil de velocidade dos reagentes antes de entrar no queimador. Um termopar tipo K posicionado no final da câmara monitora a temperatura de saída da mistura reagente.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento de teste é baseado na experiência adquirida ao longo do presente estudo bem como nos trabalhos realizados por Pereira (2002) e Catapan (2007). A seguir, apresenta-se a seqüência de etapas executadas durante um teste com combustível líquido:

1. Ligar o sistema de exaustão do laboratório;
2. Encher o tanque de etanol;
3. Com a tampa do tanque de etanol ainda aberta, abrir o cilindro de nitrogênio para expulsar o ar do interior do tanque. Em seguida, fechar a tampa e regular a pressão para 3,5 bar com a válvula reguladora de pressão do nitrogênio;
4. Ligar o sistema de aquisição de dados (Agilent – 34970A) e iniciar as medições de temperatura;
5. Ajustar a pressão da linha de ar para 2 bar.
6. Abrir a válvula de bloqueio do ar e ajustar a vazão para 50 lpm;
7. Ligar a resistência elétrica de aquecimento do ar e ajustar uma tensão no variômetro capaz de manter a temperatura do ar em 400°C;
8. Deixar o ar aquecido circulando por aproximadamente 15 minutos para aquecer todo o sistema. Paredes frias provocariam a

condensação do etanol no interior do queimador e na câmara de mistura;

9. Ligar a vela incandescente para aquecer o etanol e ajustar a temperatura de 80°C no termostato digital;
10. Abrir a válvula de bloqueio da linha de etanol e acionar o bico injetor com uma vazão de 7 cm³/min através do *LabView*. A vazão de 7 cm³/min de etanol e a vazão de ar de 50 lpm mencionada na etapa 6, correspondem ao ponto de operação $\Phi = 0,8$ e $u_{ch} = 30$ cm/s que se mostrou apropriado para acender o queimador.
11. Efetuar a ignição do queimador com uma chama piloto. Em seguida, fechar a janela de ignição;
12. Logo que é dada a ignição, uma chama livre se forma na superfície do meio poroso. É preciso aguardar alguns instantes, aproximadamente 2 a 3 minutos, para a cerâmica se aquecer e a chama se propagar para o interior do meio poroso.
13. Passar para o ponto de operação ajustando as vazões de ar e etanol que resultem na razão de equivalência (Φ) e na velocidade de chama (u_{ch}) desejados. Uma vez ajustado o ponto de operação, deve-se aguardar o regime permanente que é atingido em torno de 20 a 30 minutos. Assim como no procedimento experimental adotado por Catapan (2007), assume-se que o regime permanente é alcançado quando os termopares não apresentam variações maiores que 10°C durante um período de no mínimo 10 minutos. Nesse caso, a chama é dita estacionária e o ponto de operação testado é considerado estável;
14. Se o ponto de operação for de combustão rica em combustível, efetuar a ignição dos produtos na saída do tubo de exaustão. A chama estabilizada na saída da exaustão do queimador deve ser monitorada constantemente para garantir que o gás de síntese está sendo queimado;
15. Com o queimador operando em regime permanente, registrar as temperaturas dos termopares, posicionar a sonda refrigerada no tubo de exaustão do queimador e medir a composição dos produtos com o analisador de gases;
16. Passar para a próxima condição de Φ e u_{ch} que se deseja testar e repetir o procedimento.

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta resultados e discussões sobre as medições realizadas na bancada experimental. Os resultados estão divididos em duas seções principais: combustão pobre em combustível ($\Phi < 1$) e combustão rica em combustível ($\Phi > 1$). Esta divisão foi necessária pelas diferenças de comportamento observadas entre os dois regimes.

Foram realizados testes com gás natural, butano e etanol. Para cada combustível são apresentados perfis de temperatura no meio poroso, diagrama de estabilidade de chama e análise da composição dos produtos.

4.1 COMBUSTÃO POBRE EM COMBUSTÍVEL ($\Phi < 1$)

4.1.1 Diagramas de estabilidade de chama

Aqui são apresentados os diagramas de estabilidade de chama obtidos para cada combustível testado na bancada experimental. Os pontos assinalados nos diagramas estão divididos em quatro grupos: chama estável, limite superior de estabilidade, limite inferior de estabilidade e limite de temperatura máxima de operação, que é determinado pela temperatura máxima suportada pela espuma cerâmica (1550°C). O limite superior de estabilidade é definido pelo descolamento de chama do meio poroso, identificado através dos termopares. Já o limite inferior de estabilidade acontece quando a chama se estabiliza muito próxima da placa de injeção e as temperaturas nessa região ultrapassam o limite máximo de temperatura suportada pelo material da placa (1200°). Em nenhum momento foi registrado retorno de chama.

4.1.1.1 Gás natural

A Figura 4.1 mostra o diagrama de estabilidade de chama obtido para o queimador poroso operando com gás natural e ar pré-misturados. Foram adicionadas duas linhas de tendência polinomial de segundo grau, uma sobre os pontos do limite superior de estabilidade e outra sobre os pontos do limite inferior.

Nota-se que para cada razão de equivalência existe uma faixa de velocidades em que é possível estabilizar a chama dentro do meio poroso, ao contrário de chamas livres pré-misturadas que apresentam um único valor de velocidade de chama. O diagrama mostra que para

$\Phi=0,5$, por exemplo, obtiveram-se pontos de operação estável com velocidades de chama entre 22,5 cm/s e 32,5 cm/s. Esta faixa de estabilidade tende a crescer conforme a razão de equivalência vai se aproximando da unidade.

O gráfico inclui para referência dados de velocidade de chama laminar (S_L) e o limite inferior de inflamabilidade (LII) para metano e ar. O limite de inflamabilidade para o metano, que é o principal componente do gás natural, foi obtido de Law (2006) e os dados de velocidade de chama laminar foram calculados com o PREMIX do software *Chemkin*®, utilizando o mecanismo GRIMEch 3.0.

Com o queimador poroso foi possível estabilizar chamas com velocidades bem acima da velocidade de chama laminar do metano. Para metano e ar na razão de equivalência 0,55 a velocidade de chama laminar é de 8 cm/s. No presente trabalho, para a mesma razão de equivalência, obteve-se chama estável com velocidade de chama de 35 cm/s, que representa um aumento de 4,4 vezes. Acima de $\Phi=0,55$ não foi possível obter pontos estáveis em virtude das altas temperaturas medidas no interior do queimador, que rapidamente ultrapassavam o limite de temperatura máxima de operação (1550°C) e o teste precisava ser imediatamente interrompido.

Pontos estáveis em razões de equivalência abaixo do limite inferior de inflamabilidade de uma chama livre de metano foram obtidos. O LII para metano e ar acontece em $\Phi=0,50$, enquanto que para o queimador poroso utilizado aqui foi possível atingir o limite de $\Phi=0,40$, que representa uma extensão de 20%.

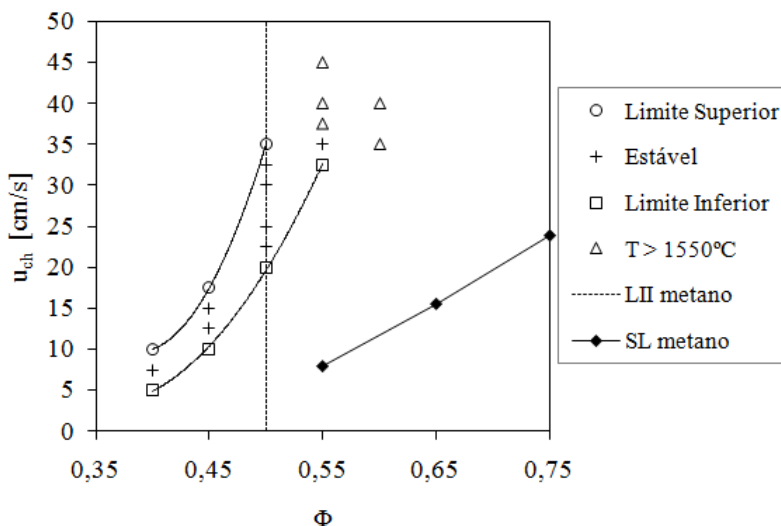


Figura 4.1– Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão pobre de gás natural (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar para metano calculada com GRIMech 3.0 (símbolos sólidos).

Na Figura 4.2 o diagrama de estabilidade obtido no presente trabalho é comparado com o diagrama obtido por Pereira (2002) e por Catapan (2007). Pereira (2002) testou combustão de metano com 99,5% de pureza em um queimador poroso aberto para o ambiente, formado por cerâmicas de Al_2O_3 e ZrO_2 com 70 mm de diâmetro e sem placa de injeção. O meio poroso tem duas camadas de 40 mm de comprimento cada, sendo a região de pré-aquecimento (RP) com densidade linear de poros de 40 ppi e a região de estabilização de chama (REC) com 10 ppi. Já no trabalho de Catapan (2007), os testes foram realizados com metano 99,8% de pureza em um queimador poroso que possui uma placa de injeção com um orifício central de 16 mm de diâmetro. O meio poroso utilizado pelo autor é feito do mesmo material, possui as mesmas dimensões e mesma configuração das camadas RP e REC que o meio poroso utilizado por Pereira (2002). Vale lembrar que no presente estudo o combustível utilizado foi o gás natural, o queimador possui uma placa de injeção com um orifício central de 10 mm e a saída do queimador é fechada com uma tampa que contém um tubo para exaustão em seu centro. O diâmetro do meio poroso é menor, possui 50 mm, mas

o material e as outras dimensões do meio poroso são as mesmas encontradas nos dois trabalhos mencionados.

O diagrama mostra limites de estabilidade diferentes para os três trabalhos. Isto se deve a diferenças construtivas dos três queimadores e diferenças no formato da chama. As faixas de estabilidade obtidas por Catapan (2007) e por Pereira (2002) se estendem até razões de equivalência mais altas, sendo que o limite de temperatura máxima de operação é o mesmo para os três casos comparados aqui (1550°C). Como foi visto anteriormente, o queimador utilizado no presente trabalho possui a saída fechada por uma tampa com um tubo de exaustão, diferentemente dos queimadores utilizados pelos dois autores citados que são abertos para o ambiente. Sendo assim, com maior perda de calor para o ambiente é possível testar razões de equivalência maiores sem ultrapassar o limite de temperatura máxima de operação.

Queimadores que possuem uma placa de injeção tendem a formar uma chama com formato cônico. Quando o queimador não possui placa de injeção, como é o caso da configuração testada por Pereira (2002), o mecanismo de estabilização de chama se baseia na diferença de propriedades entre a RP e a REC e a chama assume um formato aproximadamente plano. Catapan (2007) explica que frentes de chama com formato cônico possuem área maior que frentes de chama planas. Sendo assim, a velocidade local dos reagentes atravessando a frente de chama diminui para uma mesma vazão de mistura reagente. Sabe-se que a velocidade de propagação da frente de chama é função da composição da mistura reagente e das condições de pré-aquecimento e mantém-se aproximadamente constante nas duas configurações. Com isso, uma chama cônica permaneceria estacionária a uma vazão de mistura reagente maior que uma chama plana, resultando em velocidades de chama maiores. Por esse motivo, as velocidades de chama medidas por Catapan (2007) são, em geral, maiores que as velocidades medidas por Pereira (2002). Apesar de o queimador do presente trabalho possuir uma placa de injeção, observa-se que o diagrama de estabilidade se aproxima mais do diagrama obtido por Pereira (2002). Catapan (2007) explica que quando a saída do queimador se encontra em um ambiente em alta temperatura, a chama pode adquirir um formato plano mesmo para um queimador com placa de injeção. Como o queimador do presente trabalho possui a saída fechada por uma tampa, é possível que a chama tenha assumido um formato plano resultando em velocidades de chama mais próximas das obtidas por Pereira (2002). Para confirmar este fato seria necessário realizar medições de temperatura em diferentes posições

ao longo do raio queimador a fim de identificar o formato da frente de chama.

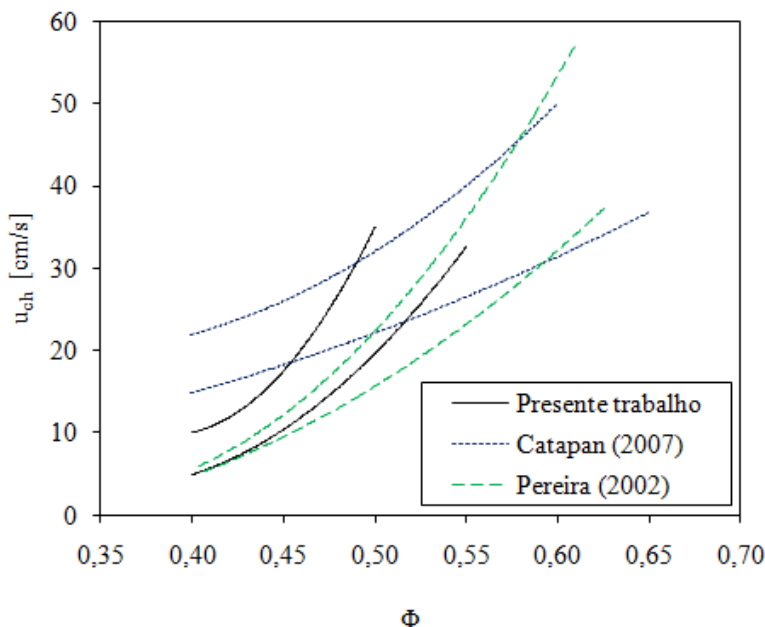


Figura 4.2 – Comparação entre os diagramas de estabilidade de chama de Pereira (2002), Catapan (2007) e do presente trabalho.

4.1.1.2 Butano

A Figura 4.3 mostra o diagrama de estabilidade de chama obtido para o queimador poroso operando com butano e ar pré-misturados. Assim como no diagrama para gás natural, observa-se que existe uma faixa de velocidades de chama em cada razão de equivalência. Em $\Phi=0,55$, por exemplo, obtiveram-se pontos de operação estável com velocidades de chama entre $u_{ch}=15$ cm/s e $u_{ch}=25$ cm/s.

Outra característica da Figura 4.3 que também foi observada no diagrama de estabilidade do gás natural foi a extensão do limite inferior de inflamabilidade. O diagrama mostra que foi possível obter chamas estáveis até $\Phi=0,45$, ou seja, uma razão de equivalência 21% inferior ao limite de inflamabilidade de uma chama livre de butano, que é $\Phi=0,57$.

O diagrama apresenta a curva de velocidade de chama laminar (S_L) para butano e ar obtida de Frassoldati *et al.* (2010). O trabalho desses autores não fornece valores da velocidade de chama para razões de equivalência abaixo de 0,7 e no experimento não foi possível atingir razões de equivalência acima de 0,6, em função das altas temperaturas medidas (acima de 1550°C). Mesmo sem poder fazer uma comparação direta entre a velocidade de chama laminar e a velocidade de chama medida no experimento, é possível dizer que o queimador poroso novamente permitiu velocidades de chama acima da velocidade de chama laminar.

Não foram encontrados trabalhos na literatura sobre combustão de butano em meios porosos para poder comparar com os resultados obtidos no presente estudo.

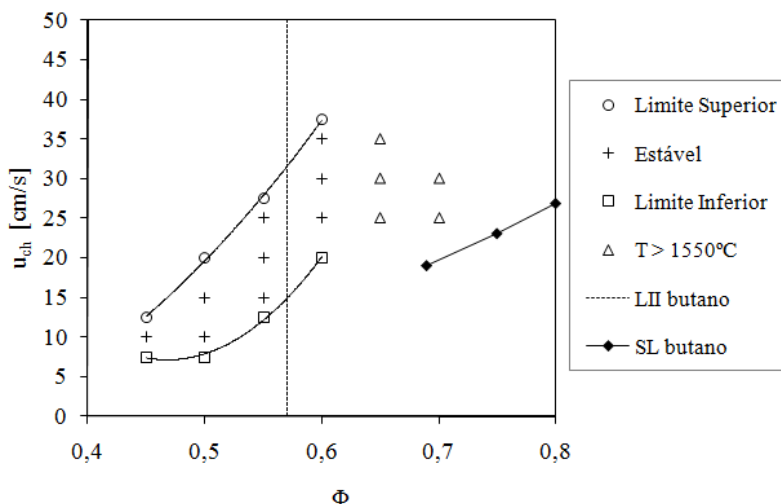


Figura 4.3 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão pobre de butano (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar obtida de Frassoldati *et al.* (2010) (símbolos sólidos).

4.1.1.3 Etanol

Para realizar os testes com etanol foram necessárias algumas alterações no experimento, conforme descrito no capítulo 3. Por se tratar de um combustível líquido, o sistema de injeção e controle de vazão de

combustível e a câmara de mistura são diferentes dos utilizados nos testes com gás natural e butano.

Nos testes de combustão pobre a vazão de combustível líquido é muito baixa, estando muito próxima da vazão mínima capaz de ser controlada com o bico injetor empregado. Nesse caso as incertezas de medição são em torno de 50%, dificultando a interpretação dos resultados obtidos. Embora chamas estáveis de etanol tenham sido obtidas, os resultados para combustão pobre de etanol não serão mostrados aqui em função das altas incertezas de medição da vazão do combustível.

O sistema de alimentação de etanol utilizado é adequado para testes de combustão rica, onde a vazão de combustível exigida é maior. Os resultados para combustão rica de etanol serão apresentados mais a frente, na seção 4.2.

4.1.2 Distribuição de temperatura no meio poroso

Aqui são apresentados os resultados das medições de temperatura no centro do meio poroso em função da posição axial x/L e da velocidade de chama. Sendo L o comprimento total do queimador, a posição axial $x/L = 0$ indica a superfície de entrada dos reagentes no meio poroso e a posição $x/L = 1$ a superfície de saída dos produtos do meio poroso. Os gráficos incluem a temperatura de chama adiabática como referência, calculada com o EQUIL do software *Chemkin*®. No cálculo da temperatura de chama adiabática foram utilizadas propriedades termodinâmicas e espécies químicas retiradas de Marinov *et al.* (1998) para o gás natural e o butano, e para o etanol utilizou-se as propriedades de Marinov (1999).

Cabe lembrar que as temperaturas indicadas pelos termopares representam um valor médio entre as temperaturas da fase sólida e da fase gasosa.

4.1.2.1 Gás natural

Os resultados das medições de temperatura na razão de equivalência 0,50 são apresentados na Figura 4.4. Os reagentes entram no meio poroso à temperatura ambiente e são aquecidos pela recirculação de calor promovida pela matriz sólida. Os reagentes pré-aquecidos atingem então a posição da frente de chama, onde ocorre um aumento brusco de temperatura. Após a chama, os produtos de combustão perdem calor para o sólido e para o ambiente à medida que

escoam em direção à saída do meio poroso, resultando em uma redução na temperatura medida.

Observa-se na Figura 4.4 a influência da velocidade de chama na posição da frente de chama e conseqüentemente na distribuição de temperatura no interior do meio poroso. Mantendo a razão de equivalência constante, o aumento da velocidade dos reagentes causa o deslocamento da frente de chama no sentido do escoamento até atingir uma nova posição onde a velocidade de propagação da chama se iguala à velocidade do escoamento e a frente de chama estabiliza novamente. Entre $u_{ch} = 22,5$ cm/s e $u_{ch} = 32,5$ cm/s a potência do queimador varia de 0,77 kW até 1,11 kW.

Nota-se que foram medidas temperaturas acima da temperatura de chama adiabática do gás natural. Para $\Phi=0,50$, mediu-se no queimador poroso uma temperatura máxima de 1414°C, sendo que a temperatura de chama adiabática nessa razão de equivalência é de 1210°C.

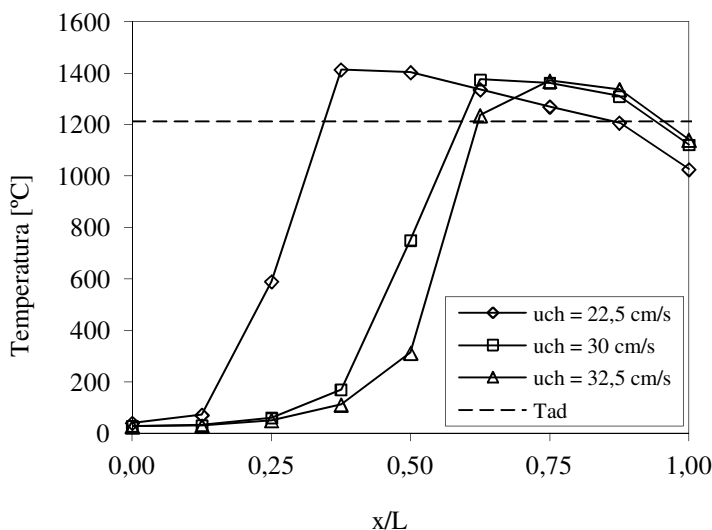


Figura 4.4 - Distribuição de temperatura no centro do meio poroso operando com gás natural na razão de equivalência 0,50.

A Figura 4.5 mostra a temperatura máxima medida em cada ponto de operação estável testado. Em $\Phi=0,40$ mediu-se uma diferença de 59°C entre a temperatura de chama adiabática e a máxima

temperatura no queimador poroso. Na razão de equivalência 0,55 essa diferença chega a 206°C.

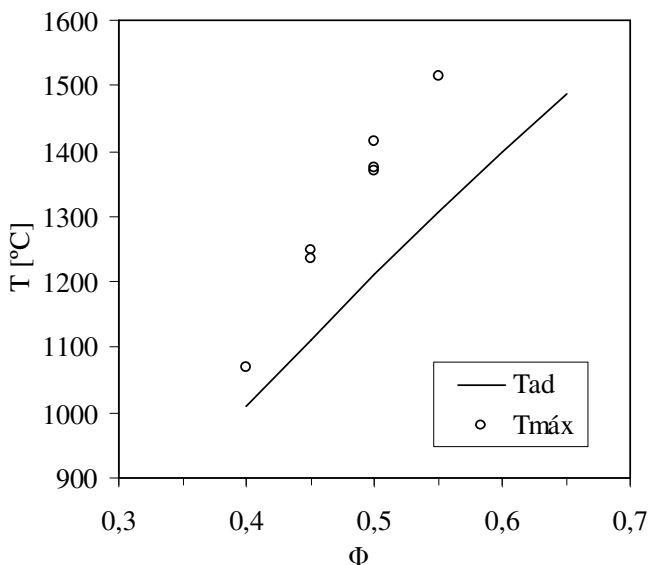


Figura 4.5 - Temperatura de chama adiabática para o gás natural e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.

Com o aumento da razão de equivalência a mistura reagente se aproxima da condição estequiométrica e as temperaturas medidas no queimador aumentam. Existe uma pequena diferença de temperaturas máximas em função de u_{ch} para a mesma razão de equivalência, como pode ser observado para $\Phi=0,50$ na Figura 4.4.

4.1.2.2 Butano

A Figura 4.6 apresenta medições de temperatura no queimador poroso operando com butano na razão de equivalência 0,60. Os perfis de temperatura mostrados são semelhantes aos obtidos para o gás natural. Tem-se inicialmente uma região de pré-aquecimento dos reagentes, um pico de temperatura na região da chama e em seguida uma diminuição da temperatura em função das trocas de calor. Em $\Phi=0,60$ e $u_{ch}=30$ cm/s foram medidas temperaturas de até 1481°C, um pouco acima da

temperatura de chama adiabática que é 1429°C.

Ainda na Figura 4.6, observa-se a influência da velocidade de chama na distribuição de temperatura. Assim como observado nos testes com gás natural, o aumento da velocidade de chama desloca a frente de chama na direção do escoamento. Variando a velocidade de chama de 25 cm/s até 35 cm/s, a potência do queimador varia de 1,02 kW até 1,43 kW.

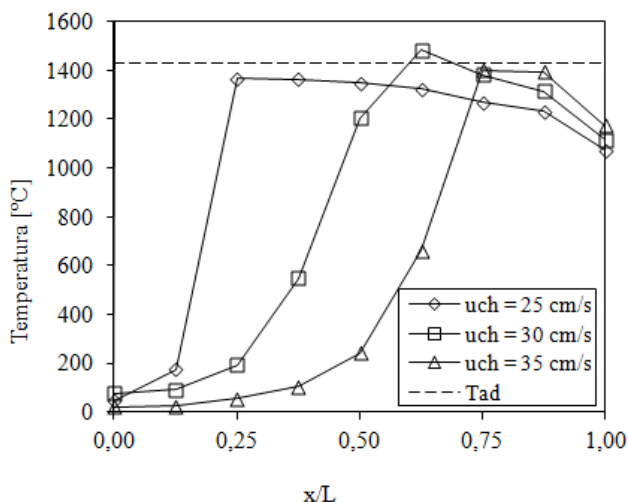


Figura 4.6 - Distribuição de temperatura no centro do meio poroso operando com butano na razão de equivalência 0,60.

As máximas temperaturas medidas em cada ponto de operação estável estão apresentadas no gráfico da Figura 4.7. Observa-se que as temperaturas medidas estão em torno da temperatura de chama adiabática.

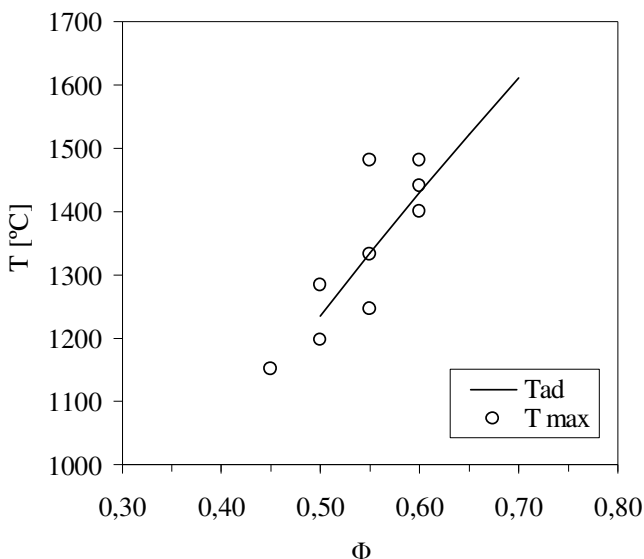


Figura 4.7 - Temperatura de chama adiabática para o butano e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.

4.1.3 Resumo

Os resultados de combustão pobre em combustível apresentados mostram que o funcionamento do queimador poroso operando com gás natural ou butano é semelhante. Para os dois combustíveis foram medidas velocidades de chama acima da velocidade de chama laminar, obteve-se uma faixa de velocidades de chama em cada razão de equivalência, o limite inferior de inflamabilidade foi estendido e foram medidas temperaturas da mesma ordem ou acima da temperatura de chama adiabática. Essas características observadas são típicas de combustão em meios porosos e já foram reportadas por diversos autores em trabalhos realizados com metano, conforme descrito na revisão bibliográfica do capítulo 2. Não foram identificados na literatura outros trabalhos equivalentes com butano.

4.1 COMBUSTÃO RICA EM COMBUSTÍVEL ($\Phi > 1$)

4.2.1 Diagramas de estabilidade de chama

Nesta seção são apresentados os diagramas de estabilidade de chama para combustão rica de gás natural, butano e etanol. Novamente, os pontos assinalados nos diagramas estão divididos em quatro grupos: chama estável, limite superior de estabilidade, limite inferior de estabilidade e limite de temperatura máxima de operação.

4.2.1.1 Gás natural

A Figura 4.8 mostra o diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão rica de gás natural. Diferentemente do diagrama para combustão pobre, as velocidades medidas não superaram as velocidades de chama laminar. Foram obtidos pontos estáveis entre $\Phi=1,3$ e $\Phi=1,5$ e nesta faixa de razão de equivalência as velocidades no queimador poroso são da mesma ordem que a velocidade de chama laminar.

Outra diferença observada no diagrama é a estreita faixa de velocidades de chama medidas em cada razão de equivalência. Em $\Phi=1,3$, razão de equivalência na qual se obteve a faixa mais ampla, foram obtidas chamas estáveis nas velocidades de chama $u_{ch}=20$ cm/s e $u_{ch}=22,5$ cm/s.

Nota-se ainda que para combustão rica não foi possível ultrapassar o limite superior de inflamabilidade (LSI) do metano. A máxima razão de equivalência alcançada nos testes foi $\Phi=1,50$, enquanto que o LSI do metano é $\Phi=1,67$.

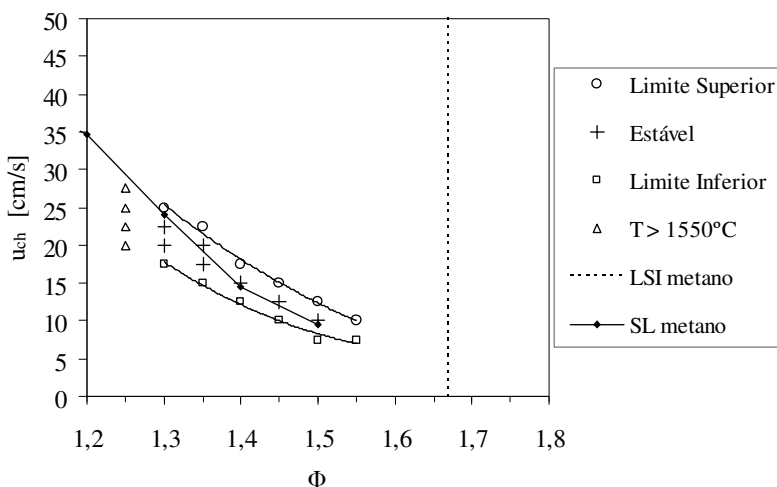


Figura 4.8 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão rica de gás natural (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar para metano calculada com GRIMEch 3.0 (símbolos sólidos).

Um comportamento semelhante foi observado por Vogel e Ellzey (2005), que testaram um queimador com meio poroso de FeCrAlY com 5,08 cm de diâmetro e 5,08 cm de comprimento. O queimador não possui placa de injeção e o meio poroso é formado por duas camadas de 2,54 cm, sendo a primeira camada com 60 ppi e a segunda com 10 ppi. Os autores obtiveram o diagrama de estabilidade mostrado na Figura 4.9. Nesse gráfico a velocidade de chama está no eixo das abscissas e a razão de equivalência no eixo das ordenadas. A linha pontilhada representa a velocidade de chama laminar do metano e os triângulos mostram os pontos estáveis encontrados. Os autores identificaram dois regimes distintos, o superadiabático para $\Phi < 0,65$ e o regime subadiabático para $0,65 < \Phi < 1,45$. Aqueles autores denominaram subadiabático e superadiabático os regimes nos quais a velocidade de chama no meio poroso é menor e maior que a velocidade de chama laminar, respectivamente.

Assim como no presente trabalho, os autores citados mediram velocidades de chama maiores que a velocidade de chama laminar e obtiveram uma ampla faixa de velocidades para combustão pobre para $\Phi < 0,65$. Na combustão rica as velocidades medidas no queimador são menores que a velocidade de chama laminar e a faixa de estabilidade é

significativamente mais estreita. Nota-se que a faixa de estabilidade alcançada para $\Phi \leq 0,65$ é muito maior que a obtida neste trabalho, evidenciando diferenças em propriedades termofísicas e características construtivas daquele queimador.

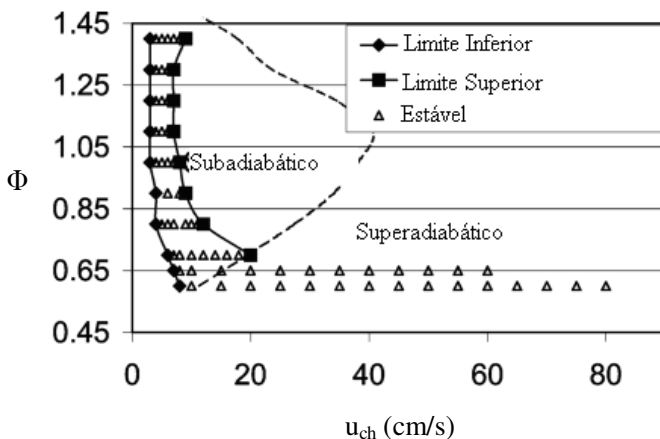


Figura 4.9 – Diagrama de estabilidade mostrando os regimes subadiabáticos e superadiabáticos na combustão de metano em meio poroso (adaptado de Vogel e Ellzey, 2005) .

A velocidade de chama no meio poroso é determinada pelo balanço entre o calor liberado na combustão, o calor recirculado e as perdas de calor. Se a parcela de calor recirculado diminui, em função de um aumento de perdas de calor, é possível obter velocidades de chama no meio poroso abaixo da velocidade de chama laminar (Wood e Harris, 2008).

A perda de calor do queimador foi calculada através do balanço de energia considerando o volume de controle mostrado na Figura 4.10.

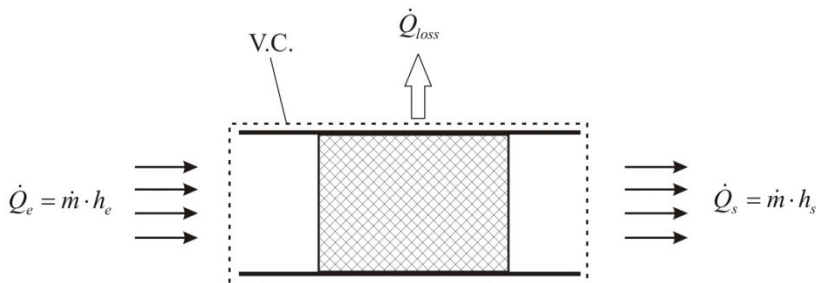


Figura 4.10 – Volume de controle adotado para o balanço de energia.

A parcela de energia entrando no volume de controle, \dot{Q}_e , é obtida através da vazão mássica da mistura reagente (\dot{m}) multiplicada pela entalpia dos reagentes h_e , que é calculada com base na composição da mistura à temperatura ambiente de 25°C. A parcela de energia que sai do volume de controle nos produtos de combustão, \dot{Q}_s , é obtida através da vazão mássica (\dot{m}) multiplicada pela entalpia dos produtos h_s , que é calculada considerando a composição de equilíbrio químico dos produtos de combustão na temperatura medida na saída do queimador. As entalpias dos reagentes e dos produtos foram calculadas com o software EES – *Engineering Equation Solver* que possui uma biblioteca interna com as propriedades termodinâmicas das substâncias envolvidas.

As perdas de calor do queimador são representadas por \dot{Q}_{loss} e incluem perdas pelas paredes laterais e perdas por radiação na superfície de saída do queimador. Aplicando a conservação da energia obtém-se a equação para o cálculo da perda de calor:

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{Q}_e - \dot{Q}_s \quad (4.1)$$

A Figura 4.11 apresenta os resultados do cálculo da perda de calor para o queimador operando com gás natural, a) em valor absoluto e b) em porcentagem.

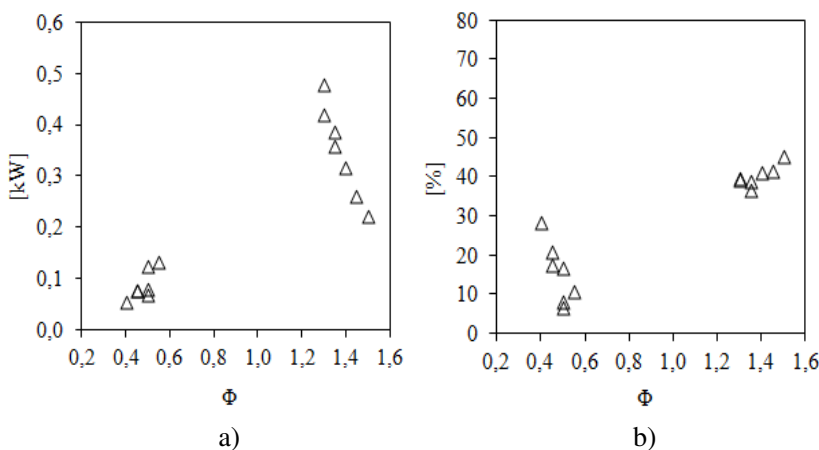


Figura 4.11 - Perda de calor do queimador (\dot{Q}_{loss}) operando com gás natural para cada ponto estável obtido, a) em valor absoluto e b) em valor percentual.

O gráfico mostra que para combustão rica em combustível a perda de calor é significativamente maior. Para combustão pobre em combustível as perdas representam de 6,5% a 28,2% da energia disponível, enquanto que para combustão rica as perdas representam de 36,7% a 45%. Estes resultados são consistentes com os resultados de velocidade de chama apresentados anteriormente. Com o aumento da perda de calor tem-se um menor pré-aquecimento dos reagentes, o que resultou em velocidades de chama da mesma ordem que a velocidade de chama laminar e não acima, como aconteceu para combustão pobre em combustível. O menor pré-aquecimento dos reagentes também explica a estreita faixa de estabilidade em cada razão de equivalência.

A causa da maior perda de calor na combustão rica não foi identificada. Uma possível explicação seria a existência de diferentes regimes de chama causados por cinéticas químicas diferentes na combustão pobre e na combustão rica, uma vez que o experimento permaneceu exatamente o mesmo. Para compreender melhor este comportamento são necessários mais estudos e testes adicionais.

4.2.1.2 Butano

O diagrama de estabilidade de chama para a combustão rica de butano está apresentado na Figura 4.12. Assim como na combustão pobre de butano, as velocidades de chama medidas estão acima da velocidade de chama laminar. Em $\Phi=1,8$ foram obtidos pontos estáveis para velocidades de chama desde $u_{ch}=20$ cm/s até $u_{ch}=35$ cm/s, sendo que a velocidade de chama laminar para essa razão de equivalência é de 6,9 cm/s, representando um aumento de 2,9 a 5,1 vezes.

A diferença entre o diagrama de combustão pobre e combustão rica está no limite de inflamabilidade que não foi estendido na combustão rica. A máxima razão de equivalência alcançada foi 2,1, ou seja, 25% abaixo do LSI do butano que ocorre em $\Phi=2,8$. Vale lembrar que para combustão rica de gás natural também não foi possível estender o limite superior de inflamabilidade.

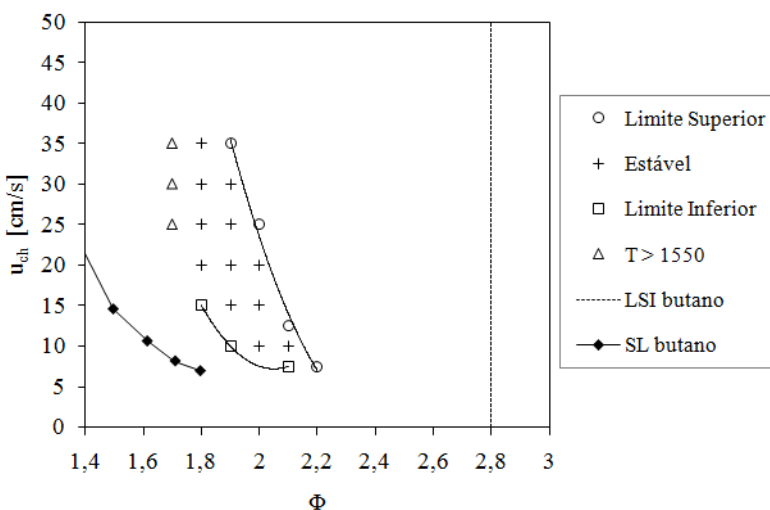


Figura 4.12 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão rica de butano (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar obtida de Frassoldati *et al.* (2010) (símbolos sólidos).

4.2.1.3 Etanol

O diagrama de estabilidade de chama para combustão rica de etanol está apresentado na Figura 4.13.

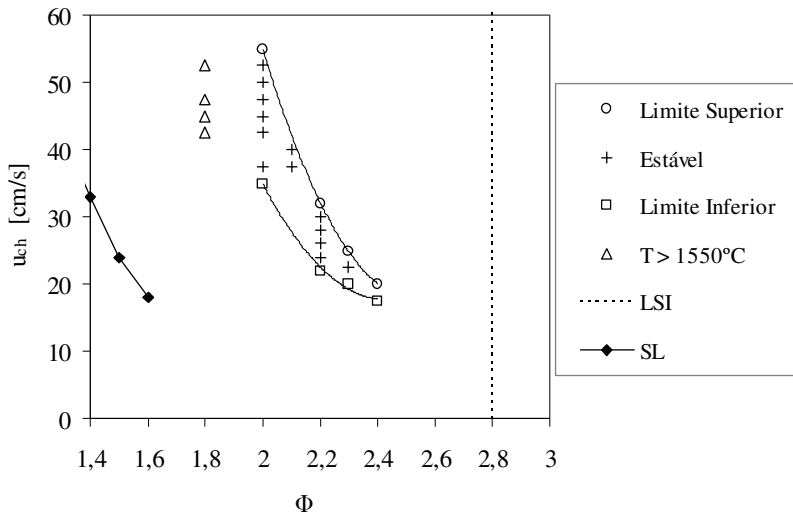


Figura 4.13 – Diagrama de estabilidade de chama obtido para combustão rica de etanol (símbolos vazados) e velocidade de chama laminar obtida de Al-Hamamre e Hararah (2010) (símbolos sólidos).

Foram obtidos pontos estáveis para razões de equivalência entre 2,0 e 2,3 e as velocidades de chama medidas são maiores que a velocidade de chama laminar. Em $\Phi=2,0$ obteve-se uma faixa de velocidade de chama variando de $u_{ch}=37,5$ cm/s a $u_{ch}=52,5$ cm/s.

A velocidade de chama laminar (SL) apresentada no diagrama considera a temperatura dos reagentes igual a 127°C e foi obtida de Al-Hamamre e Hararah (2010). Será visto mais adiante que nos testes com etanol a temperatura de entrada da mistura reagente variou entre 117°C e 131°C.

O limite superior de inflamabilidade do etanol é o mesmo que para o butano, ou seja, $\Phi=2,8$. Assim como na combustão rica de gás natural e butano, para o etanol também não foi possível ultrapassar o LSI.

4.2.2 Distribuição de temperatura no meio poroso

4.2.2.1 Gás natural

Distribuições de temperatura no centro do meio poroso para razão de equivalência de 1,30 são apresentadas na Figura 4.14. Observa-se que o aumento da velocidade dos reagentes de $u_{ch}=20$ cm/s para $u_{ch}=22,5$ cm/s desloca a frente de chama no sentido do escoamento, assim como observado nos testes de combustão pobre.

Apesar das semelhanças com os perfis de temperatura apresentados anteriormente, as máximas temperaturas medidas no meio poroso se encontram abaixo da temperatura de chama adiabática do gás natural. Este comportamento pode ser explicado pela perda de calor que, de acordo com os cálculos apresentados, é maior para combustão rica de gás natural.

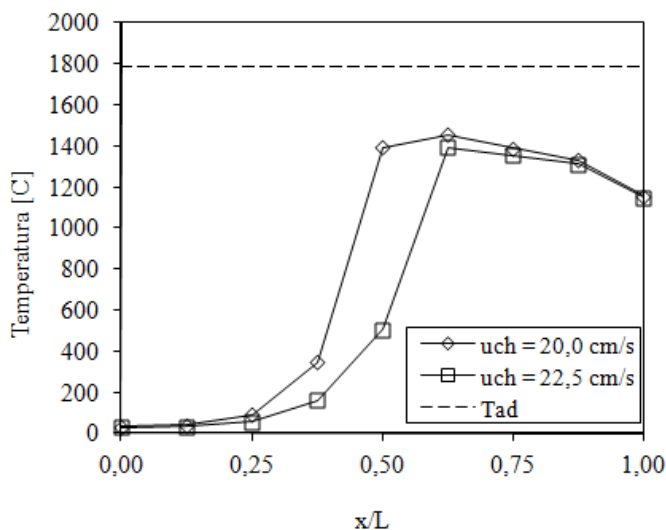


Figura 4.14 – Distribuição de temperatura no centro do meio poroso para combustão rica de gás natural, $\Phi=1,30$.

A Figura 4.15 mostra a curva de temperatura de chama adiabática e as máximas temperaturas medidas em cada ponto de operação estável. Em média, as temperaturas medidas são cerca de 20% menores que a temperatura de chama adiabática.

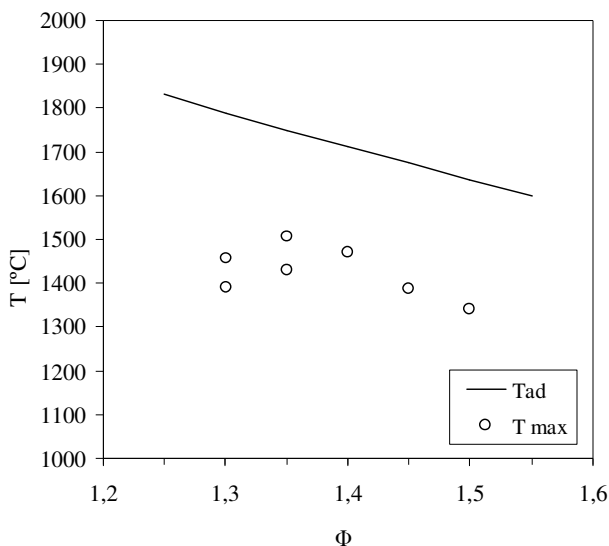


Figura 4.15 – Temperatura de chama adiabática para o gás natural e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.

Para combustão rica de gás natural obtiveram-se velocidades de chama da mesma ordem que a velocidade de chama laminar e temperaturas abaixo da temperatura de chama adiabática. Devido à recirculação de calor, mesmo com temperaturas mais baixas foi possível atingir velocidades iguais a velocidade de chama laminar.

4.2.2.2 Butano

A Figura 4.16 apresenta as medições de temperatura para o queimador poroso operando com butano na razão de equivalência 1,90. Assim como na combustão pobre de butano, as temperaturas máximas medidas no queimador poroso são da mesma ordem que a temperatura de chama adiabática.

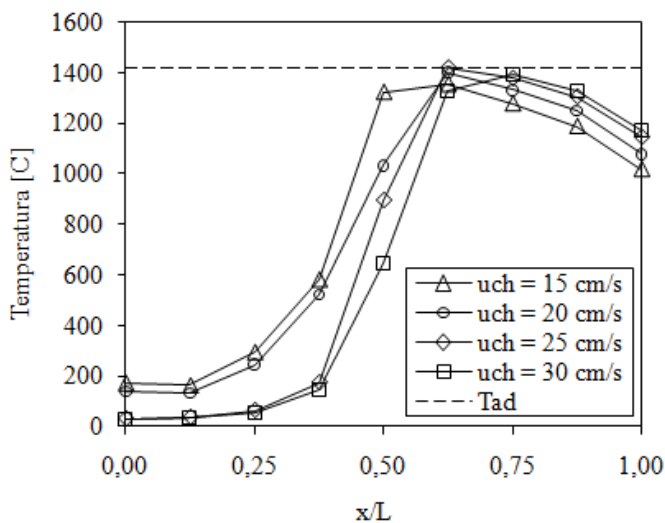


Figura 4.16 – Distribuição de temperatura no centro do meio poroso para combustão rica de butano, $\Phi=1,90$.

A Figura 4.17 mostra a temperatura de chama adiabática para combustão de butano e ar e também as máximas temperaturas medidas no queimador poroso. Observa-se que para todos os pontos estáveis foram medidas temperaturas em torno da temperatura de chama adiabática.

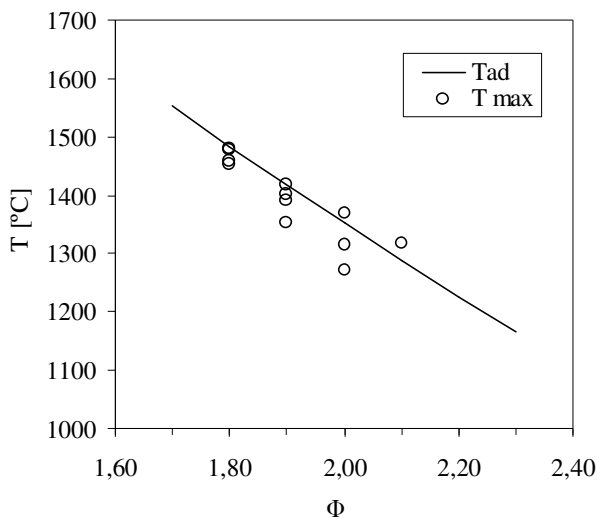


Figura 4.17 - Temperatura de chama adiabática para o butano e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.

4.2.2.3 Etanol

O gráfico da Figura 4.18 apresenta medições de temperatura para o queimador poroso operando com etanol em $\Phi=2,2$ nas velocidades de chama 24 cm/s, 28 cm/s e 30 cm/s. Observa-se no gráfico que o aumento da velocidade de chama desloca a frente de chama à jusante até se estabilizar novamente em outra posição. Nota-se também que as máximas temperaturas de cada um dos três perfis apresentados estão próximas da temperatura de chama adiabática para essa razão de equivalência.

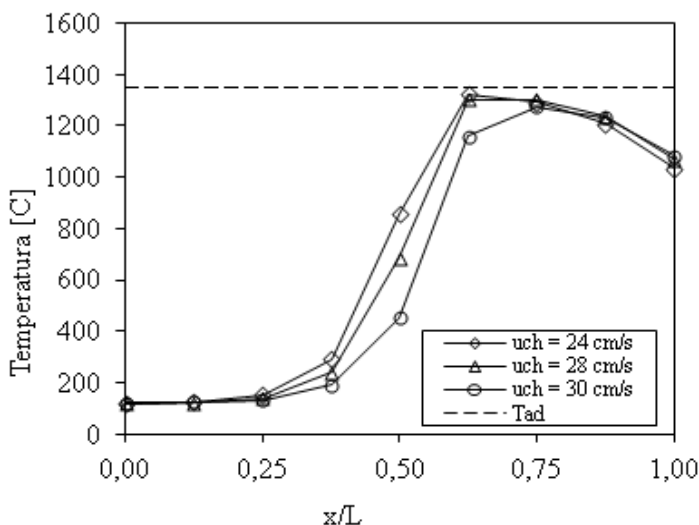


Figura 4.18 – Distribuição de temperatura no meio poroso para combustão rica de etanol, $\Phi=2,2$.

Nos experimentos com etanol a temperatura de entrada dos reagentes varia com a razão de equivalência. Conforme foi descrito no capítulo 3, a temperatura de aquecimento do ar é mantida constante em 400°C e o etanol é mantido a 80°C. Assim, aumentando a razão de equivalência, aumenta-se a quantidade de etanol na mistura resultando na diminuição da temperatura final dos reagentes. A Figura 4.19 apresenta resultados de medições da temperatura da mistura dos reagentes e também a temperatura teórica da mistura, calculada através de um balanço de energia que considera apenas a troca de calor entre o etanol e o ar, sem perdas de calor. Nota-se que as temperaturas medidas no experimento são entre 22% e 30% menores que a temperatura teórica da mistura. Essa diferença é atribuída à perda de calor para o ambiente através das paredes da câmara de mistura.

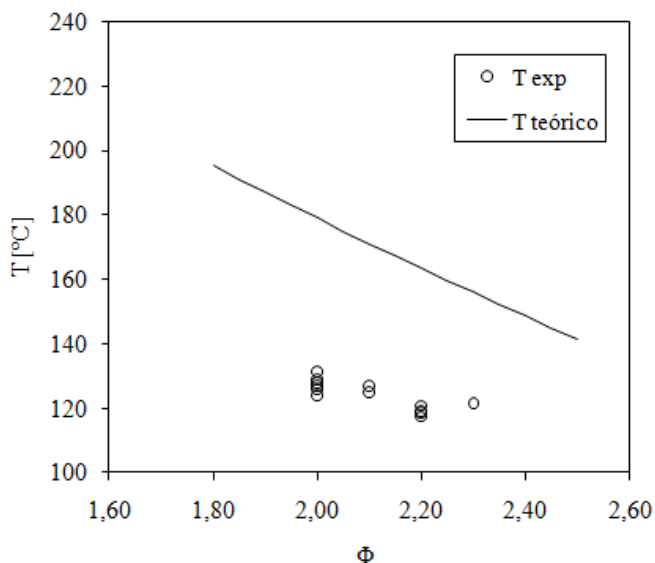


Figura 4.19 – Temperatura teórica e experimental da mistura reagentes etanol + ar.

A Figura 4.20 apresenta a curva de temperatura de chama adiabática em função da razão de equivalência e as máximas temperaturas medidas em cada ponto de operação estável. Para o cálculo da temperatura de chama adiabática utilizou-se a estimativa teórica da Figura 4.19 para determinar a temperatura de entrada dos reagentes. Observa-se que as temperaturas medidas no queimador poroso são da mesma ordem que as temperaturas de chama adiabática.

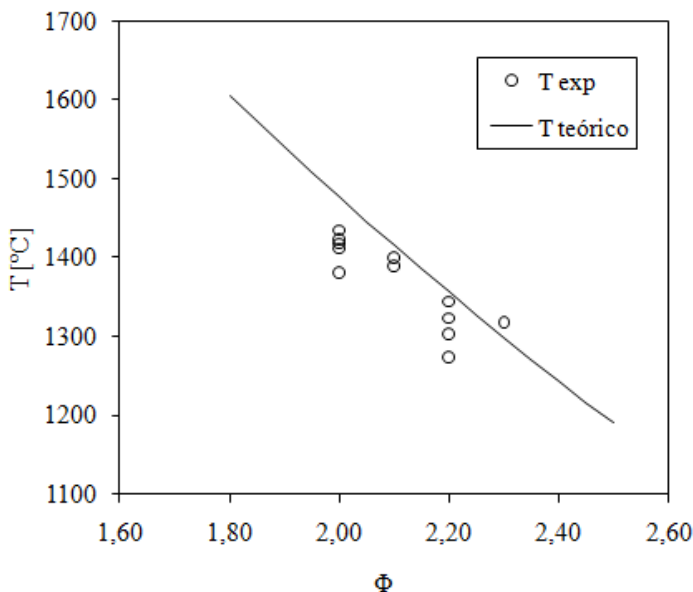


Figura 4.20 - Temperatura de chama adiabática para o etanol e temperatura máxima medida no queimador poroso em cada ponto de operação estável obtido.

4.2.3 Composição dos produtos

Nesta seção são apresentados os resultados das análises de composição dos gases de exaustão, que foram realizadas utilizando o analisador de gases *Motorscan EuroGas 8020*, conforme especificações apresentadas no capítulo 3.

Juntamente com os resultados das medições são apresentados cálculos de equilíbrio químico realizados com o software *Chemkin®* utilizando propriedades termodinâmicas e espécies químicas obtidas de Marinov *et al.* (1998) e Marinov (1999).

4.2.3.1 Gás natural

O gráfico da Figura 4.21 mostra os resultados das medições de CO e CO₂, juntamente com a curva de equilíbrio químico para comparação.

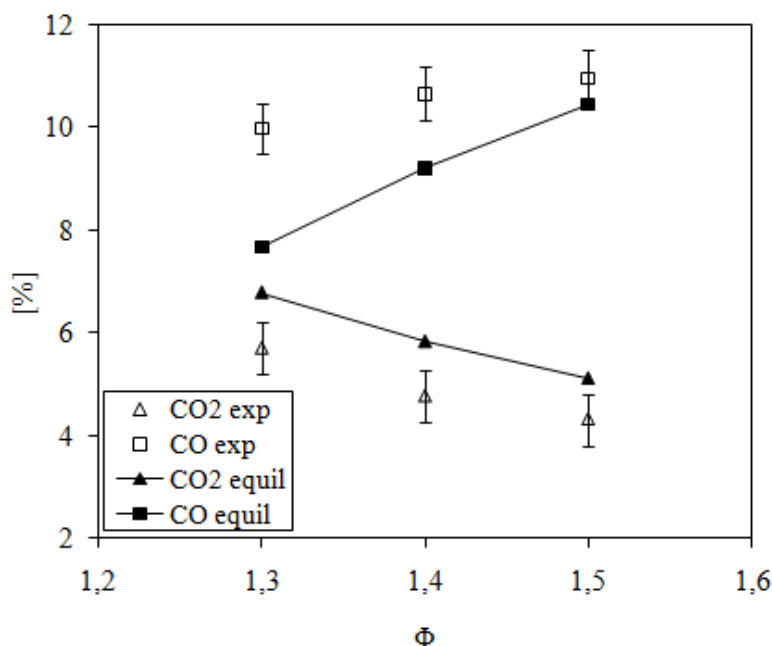


Figura 4.21 – Curva de equilíbrio químico e resultados das medições de composição dos gases de exaustão para combustão rica de gás natural e ar. Porcentagem volumétrica dos produtos em base seca em função da razão de equivalência.

As medições apresentam a mesma tendência do equilíbrio químico, ou seja, aumentando a razão de equivalência tem-se o aumento da quantidade de CO e a diminuição da quantidade de CO₂.

Medições de CO acima do equilíbrio químico indicam que parte do CO não está sendo convertido em CO₂. Esse comportamento pode ser consequência da existência de regiões mais frias próximas à parede do queimador, resultante do formato da chama e da perda de calor pelas laterais.

Sabe-se que a cinética química da reação de combustão rica é mais lenta. Kennedy *et al.* (2000) afirmam que os produtos da combustão rica são “cineticamente controlados”. As reações de combustão são relativamente rápidas, mas o equilíbrio final dos produtos pode ser controlado por reações secundárias, como por exemplo, reforma a vapor de hidrocarbonetos. Segundo os autores, uma

quantidade significativa de água é formada a partir da oxidação do metano no estágio inicial da combustão. Em seguida, em uma região de pós-combustão, a água reage com metano não queimado, contribuindo para formação de CO e H₂.

Para conhecer o tempo de residência necessário para a mistura atingir o equilíbrio químico foram realizadas simulações com o software *Chemkin*® em um reator tipo *plug flow*. No reator *plug flow*, ou reator de escoamento uniforme, a reação química ocorre enquanto a mistura reagente escoar no interior de um tubo cilíndrico e a concentração das espécies químicas pode ser avaliada em função da posição axial no reator ou do tempo de residência da mistura reagente. Assume-se que as propriedades da mistura, temperatura, pressão, concentrações e velocidade, apresentam distribuições uniformes através da seção transversal do reator. As equações que descrevem o comportamento do reator de escoamento uniforme podem ser encontradas em Turns (2005).

Os resultados da simulação são apresentados na Figura 4.22. O gráfico apresenta as frações molares das espécies químicas envolvidas na combustão de gás natural na razão de equivalência 1,50. Os cálculos foram realizados para $\Phi=1,50$ por ser a maior razão de equivalência onde foi possível obter um ponto de operação estável e, portanto, a condição que apresentaria a cinética mais lenta e produziria a maior quantidade de H₂ e CO entre todos os pontos testados. Foi considerado um reator com temperatura constante e igual à temperatura de chama adiabática para essa razão de equivalência. O comprimento do reator foi ajustado até permitir um tempo de residência suficiente para a mistura atingir o equilíbrio químico. Observa-se no gráfico que o tempo necessário para a mistura atingir o equilíbrio químico é em torno de 1,0E-03 segundos. Considerando o ponto de operação estável $\Phi=1,50$ e $u_{ch}= 10$ cm/s, e um perfil de velocidade uniforme, a mistura reagente permanece no queimador poroso por cerca de 4,0E-01 segundos. No cálculo do tempo de residência foi considerada a distribuição de temperatura medida no meio poroso. O meio poroso foi dividido em oito seções de 10 mm de comprimento cada, que corresponde à distância das medições de temperatura. Em cada seção foi calculada a velocidade do escoamento e o tempo de residência. O tempo de residência total no queimador é obtido somando os tempos de cada uma das oito seções.

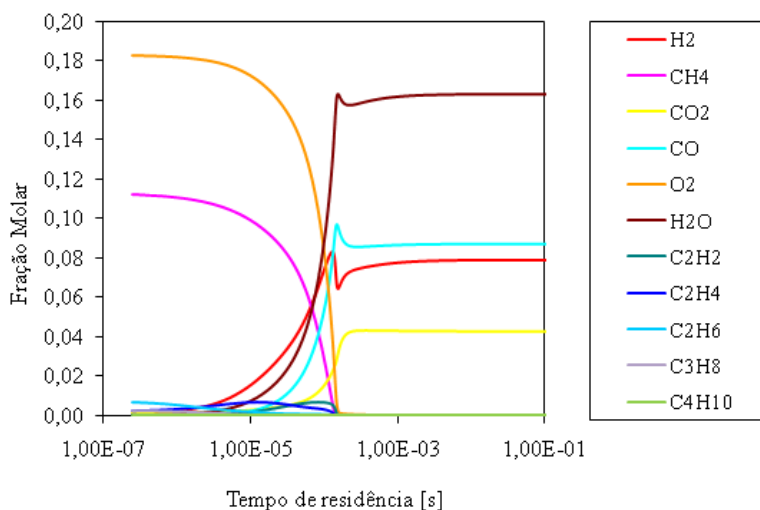


Figura 4.22 – Frações molares para uma mistura de gás natural e ar com $\Phi=1,50$ em um reator *plug flow* na temperatura de chama adiabática (mecanismo de Marinov *et al.*, 1998).

Os resultados apresentados na Figura 4.22 consideram todo o reator na temperatura de chama adiabática e um perfil de velocidade uniforme, o que não representa a condição real do queimador poroso. O perfil de temperatura dentro do queimador varia com a posição axial, conforme mostrado para a linha central do queimador no gráfico da Figura 4.18, e varia também radialmente em função do formato da chama e das perdas de calor pelas laterais. Assim, o queimador possui regiões com diferentes temperaturas, velocidades de escoamento e conseqüentemente diferentes tempos de residência necessários para atingir equilíbrio. A fim de se obter uma estimativa das frações molares mais próximas da condição real queimador, simulou-se um reator com o mesmo comprimento que o queimador poroso testado (80 mm) e foi imposto o perfil de temperatura medido no centro do meio poroso. Os resultados são mostrados na Figura 4.23 e resumidos na Tabela 4.1.

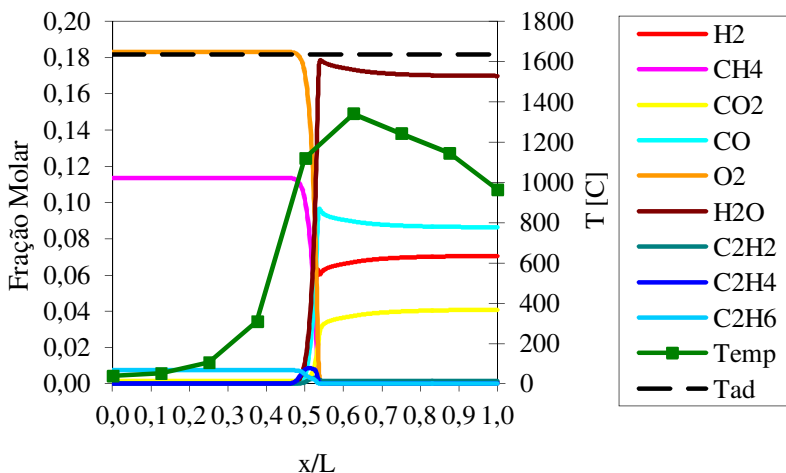


Figura 4.23 – Frações molares para combustão de gás natural e ar com $\Phi=1,5$ para um reator tipo *plug flow* de 80 mm de comprimento e perfil de temperatura de acordo com as medições realizadas no queimador (mecanismo de Marinov *et al.*, 1998).

Na tabela é possível observar que para as espécies químicas majoritárias existe uma pequena diferença entre o reator na temperatura de chama adiabática (equilíbrio químico) e o reator com perfil de temperatura variável (temperaturas medidas no queimador) e comprimento de 80 mm. Diferenças maiores foram observadas para os hidrocarbonetos CH_4 e C_2H_2 . Isso mostra que as condições de temperatura e tempo de residência no queimador são suficientes para que os produtos se aproximem da composição de equilíbrio químico.

Observa-se na Tabela 4.1 que as medições de CO e CO_2 apresentaram resultados próximos às estimativas do *Chemkin®* para o reator com temperatura variável. Com isso, é possível estimar que para o queimador poroso operando em $\Phi = 1,5$ a porcentagem de H_2 presente nos produtos seria de 8,5% em volume (base seca). Somando a produção de H_2 com mais 10,4% de CO tem-se uma produção de gás de síntese de 18,9%.

Tabela 4.1 - Frações molares para combustão de gás natural e ar, $\Phi = 1,5$.

Espécie Química	Plug flow (T_{ad})		Plug flow (Perfil de temp.)		Medições (Base seca)
	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca	
H ₂	7,91E-02	9,45E-02	7,04E-02	8,49E-02	
CO	8,74E-02	1,04E-01	8,63E-02	1,04E-01	1,09E-01
CO ₂	4,28E-02	5,11E-02	4,08E-02	4,91E-02	4,31E-02
H ₂ O	1,63E-01	-	1,70E-01	-	
CH ₄	2,44E-11	2,92E-11	8,61E-04	1,04E-03	
CH ₂ O	4,64E-09	5,55E-09	5,56E-08	6,70E-08	
C ₂ H ₂	5,47E-12	6,54E-12	1,35E-03	1,62E-03	
C ₂ H ₄	4,58E-15	5,47E-15	6,23E-05	7,51E-05	
C ₂ H ₆	7,97E-20	9,53E-20	2,16E-07	2,61E-07	
CH ₃ HCO	3,88E-19	4,64E-19	7,93E-12	9,55E-12	
N ₂	6,27E-01	7,50E-01	6,30E-01	7,59E-01	

4.2.3.2 Butano

A Figura 4.24 apresenta os resultados das medições de CO e CO₂ para os pontos estáveis obtidos nos testes, juntamente com a curva de equilíbrio químico para combustão de butano e ar na temperatura de chama adiabática.

Os resultados das medições indicam a mesma tendência prevista pelo cálculo de equilíbrio químico. O aumento da razão de equivalência resulta no aumento da quantidade de CO e na diminuição da quantidade de CO₂ presente nos produtos. Porém, as medições indicaram quantidades de CO sempre abaixo da curva de equilíbrio químico e quantidades de CO₂ sempre acima do equilíbrio. Este comportamento pode ser explicado com o auxílio da Figura 4.25.

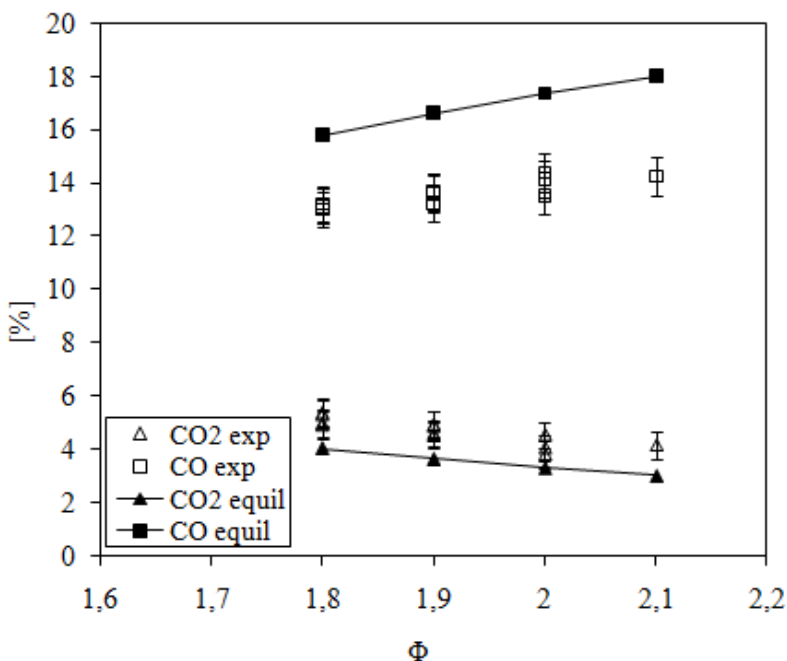


Figura 4.24 – Curva de equilíbrio químico e resultados das medições de composição dos gases de exaustão para combustão de butano e ar. Porcentagem volumétrica dos produtos em base seca em função da razão de equivalência.

A Figura 4.25 apresenta as frações molares para uma mistura reagente de butano e ar na razão de equivalência $\Phi=2,1$ em um reator *plug flow* com temperatura igual à temperatura de chama adiabática para essa razão de equivalência. A escolha da razão de equivalência de 2,1 seguiu o mesmo critério adotado anteriormente para o gás natural, ou seja, a maior razão de equivalência na qual foi possível obter um ponto de operação estável. Observa-se no gráfico que a fração molar de CO apresenta o valor máximo quando atinge o equilíbrio e que o tempo de residência necessário para atingir o equilíbrio químico é em torno de $1,0\text{E}+02$ segundos, ou $1,0\text{E}+01$ segundos para atingir cerca de 98% do equilíbrio. Considerando o ponto de operação estável $\Phi=2,1$ e $u_{ch}=10$ cm/s, a mistura reagente permanece no queimador poroso por aproximadamente $3,0\text{E}-01$ segundos. Devido à cinética química lenta da combustão rica, o tempo de residência da mistura no queimador é insuficiente para atingir o equilíbrio. Com isso, a formação de CO não é

completa e as medições indicam quantidades abaixo do previsto pelo equilíbrio químico.

Já para o CO_2 , nota-se na Figura 4.25 que a máxima fração molar ocorre em torno de $1,0\text{E}+00$ segundo e, em seguida, a quantidade de CO_2 cai até atingir o equilíbrio. No queimador poroso o tempo de residência não é suficiente para que a mistura alcance o equilíbrio e por isso as medições de CO_2 indicam quantidades acima do equilíbrio químico.

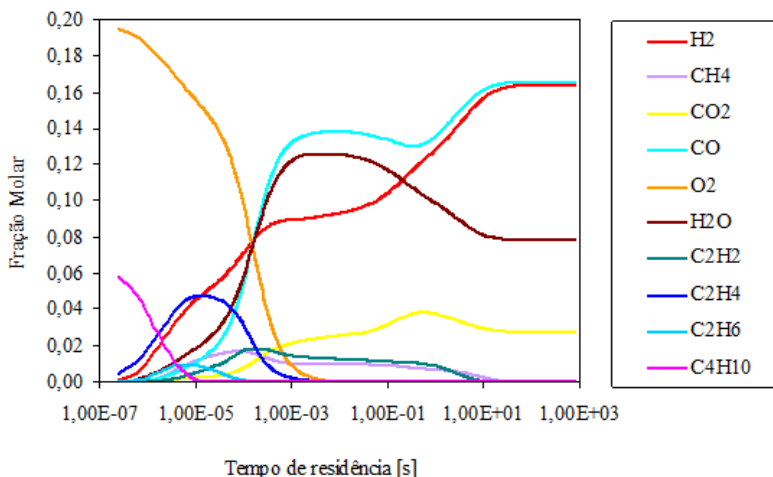


Figura 4.25 – Frações molares para uma mistura de butano e ar com $\Phi=2,1$ em um reator *plug flow* na temperatura de chama adiabática (mecanismo de Marinov *et al.*, 1998).

Assim como feito anteriormente para o gás natural, novos cálculos no *Chemkin*® foram realizados na tentativa de se obter uma estimativa mais próxima da condição real do queimador. Os cálculos foram realizados para um reator *plug flow* com o mesmo comprimento que o queimador poroso testado e com o perfil de temperatura medido no experimento. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 4.26 e na Tabela 4.2.

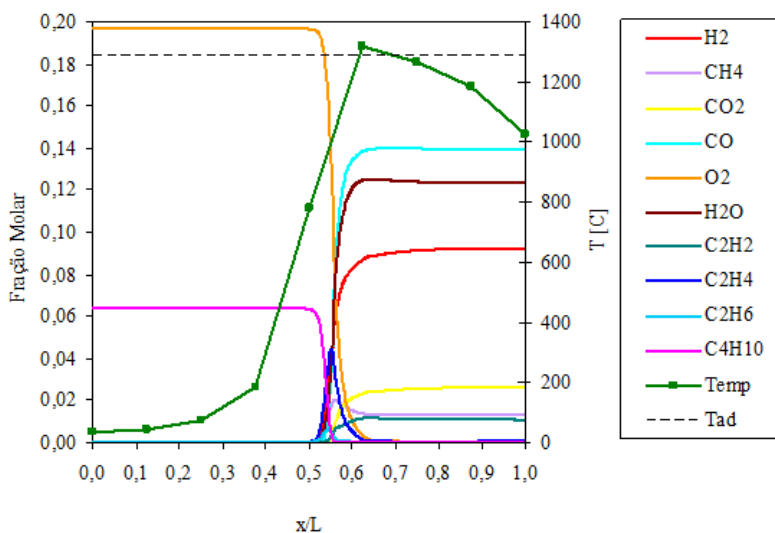


Figura 4.26 – Frações molares para combustão de butano e ar com $\Phi = 2,1$ em um reator tipo *plug flow* de 80 mm de comprimento e perfil de temperatura de acordo com as medições realizadas no queimador (mecanismo de Marinov *et al.*, 1998).

Tabela 4.2 - Frações molares para combustão de butano e ar, $\Phi = 2,1$.

Espécie Química	Plug flow (T_{ad})		Plug flow (Perfil de temp.)		Medições (Base seca)
	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca	
H ₂	1,64E-01	1,78E-01	9,21E-02	1,05E-01	
CO	1,66E-01	1,80E-01	1,39E-01	1,59E-01	1,42E-01
CO ₂	2,79E-02	3,03E-02	2,64E-02	3,01E-02	4,16E-02
H ₂ O	7,82E-02	-	1,24E-01	-	
CH ₄	5,00E-08	5,43E-08	1,33E-02	1,52E-02	
CH ₂ O	2,14E-08	2,33E-08	4,12E-07	4,71E-07	
C ₂ H ₂	2,46E-09	2,67E-09	1,07E-02	1,22E-02	
C ₂ H ₄	5,70E-11	6,18E-11	4,09E-04	4,67E-04	
C ₂ H ₆	1,53E-14	1,66E-14	4,59E-06	5,24E-06	
CH ₃ HCO	1,03E-15	1,12E-15	1,12E-09	1,28E-09	
C ₄ H ₁₀	0,00E+00	0,00E+00	1,04E-12	1,19E-12	
N ₂	5,64E-01	6,12E-01	5,94E-01	6,78E-01	

Observa-se na Tabela 4.2 que a diferença entre as frações molares em base seca do reator na temperatura de chama adiabática e do reator com perfil de temperatura variável é de 41% para o H₂ e de 11,6% para o CO. Essa diferença é maior do que a observada anteriormente para o gás natural devido à maior razão de equivalência ($\Phi=2,1$ para o butano contra $\Phi=1,5$ para o gás natural), que torna a cinética da combustão de butano muito mais lenta que a do gás natural.

Para o reator com perfil de temperatura variável obteve-se uma estimativa da fração molar de CO mais próxima da quantidade medida no experimento, diminuindo a diferença entre o valor teórico e o experimental para 10%. A estimativa teórica da fração molar de CO₂ praticamente não se alterou nos dois cenários e permanece em torno de 27% abaixo do valor medido no experimento.

Com base nos resultados da Tabela 4.2 podemos estimar que, apesar de o equilíbrio químico indicar uma produção de 17,8%, a produção real de H₂ para o queimador poroso nessa condição seria em torno de 10,5%. Isso é resultado do tempo de residência insuficiente,

que faz com que grande parte do hidrogênio ainda esteja nas moléculas de H_2O e de hidrocarbonetos como CH_4 e C_2H_2 . Observa-se na Figura 4.25 que a quantidade de H_2O presente nos produtos começa a cair por volta de 1,0E-01 segundos e simultaneamente tem-se um aumento na produção de H_2 .

Para essa condição analisada, conclui-se que somando 10,5% de H_2 com 15,9% de CO a produção de gás de síntese seria de 26,4% em volume.

4.2.3.3 Etanol

Os resultados das medições de CO e CO_2 para o queimador operando com etanol estão apresentados na Figura 4.27, juntamente com a composição de equilíbrio químico. No cálculo do equilíbrio químico foi considerada a temperatura de entrada dos reagentes como sendo igual à estimativa teórica da temperatura da mistura apresentada anteriormente.

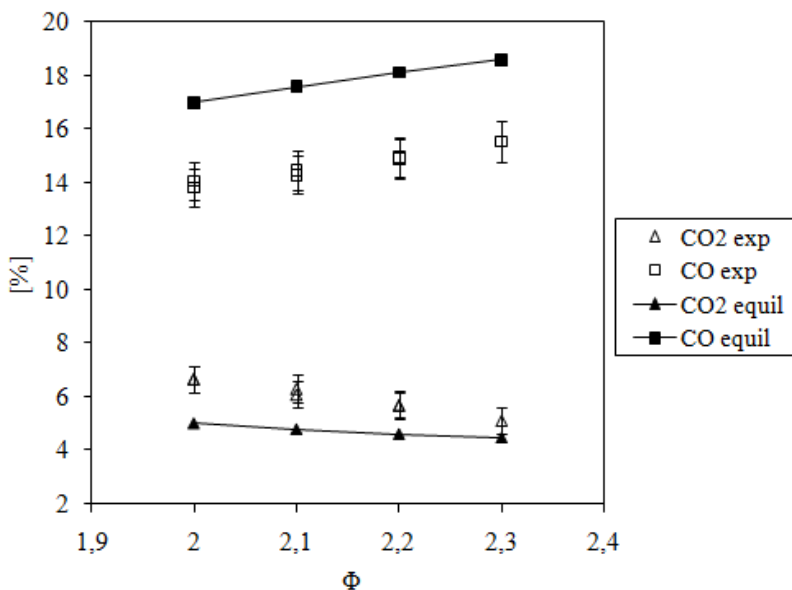


Figura 4.27- Curva de equilíbrio químico e resultados das medições de composição dos gases de exaustão para combustão de etanol e ar. Porcentagem volumétrica dos produtos em base seca em função da razão de equivalência.

Mais uma vez, os resultados das medições seguem a tendência do equilíbrio químico, ou seja, com o aumento da razão de equivalência tem-se o aumento da quantidade de CO e a diminuição da quantidade de CO₂. Assim como observado na combustão de butano, as medições indicaram quantidades de CO e CO₂ abaixo e acima do equilíbrio químico, respectivamente. Para explicar esse comportamento, recorreremos à simulação de uma mistura de etanol e ar em um reator *plug flow* na temperatura de chama adiabática. Os resultados estão apresentados na Figura 4.28. O gráfico mostra as frações molares em função do tempo para uma mistura com $\Phi=2,3$, que foi a maior razão de equivalência onde foi possível obter uma chama estável no queimador. Observando a evolução da fração molar de CO com o tempo, percebe-se que esta atinge seu valor máximo quando alcança o equilíbrio químico, que acontece em aproximadamente 1,0E+02 segundos, ou 1,0E+01 segundos para alcançar cerca de 98% do equilíbrio. Nota-se também que a fração molar de CO₂ atinge seu valor máximo em torno de 1,0E+00 segundo e em seguida é reduzida até chegar ao patamar do equilíbrio químico. Para o ponto de operação estável $\Phi=2,3$ e $u_{ch}= 22,5$ cm/s, a mistura reagente permanece no queimador poroso por aproximadamente 2,0E-01 segundos. Sendo assim, o queimador poroso utilizado nos testes não permite um tempo de residência necessário para atingir o equilíbrio e as reações cessam antes que a fração molar de CO atinja seu máximo e que a fração molar de CO₂ diminua até o patamar do equilíbrio.

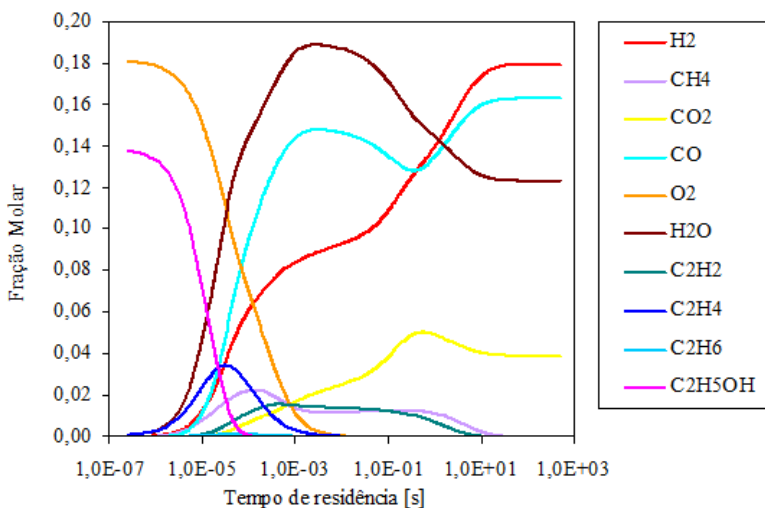


Figura 4.28 – Frações molares para uma mistura de etanol e ar com $\Phi=2,3$ em um reator *plug flow* na temperatura de chama adiabática (mecanismo de Marinov, 1999)

Uma estimativa mais aproximada da composição real dos produtos pode ser obtida através da simulação em um reator *plug flow* com o mesmo comprimento do queimador poroso utilizado (80 mm) e com uma distribuição de temperatura conforme medido no experimento. Os resultados são apresentados na Figura 4.29 e na Tabela 4.3.

A tabela mostra que a diferença entre os resultados do *Chemkin*® para o reator na temperatura de chama adiabática e o reator com temperatura variável chega a 45% para o H_2 e 5% para o CO. As diferenças são próximas das encontradas anteriormente na análise da combustão de butano e resultam da cinética lenta da combustão rica e do comprimento insuficiente do reator que não permite que a mistura alcance o equilíbrio. Com isso, parte do hidrogênio presente nos produtos permanece nas moléculas de H_2O e hidrocarbonetos como CH_4 e C_2H_2 .

Observa-se na Tabela 4.3 que as quantidades de H_2 e CO estimadas para o queimador poroso operando com etanol e ar na razão de equivalência 2,3 são de 11,3% e 17,7%, respectivamente. Isso resulta em uma produção de gás de síntese de 29% em volume.

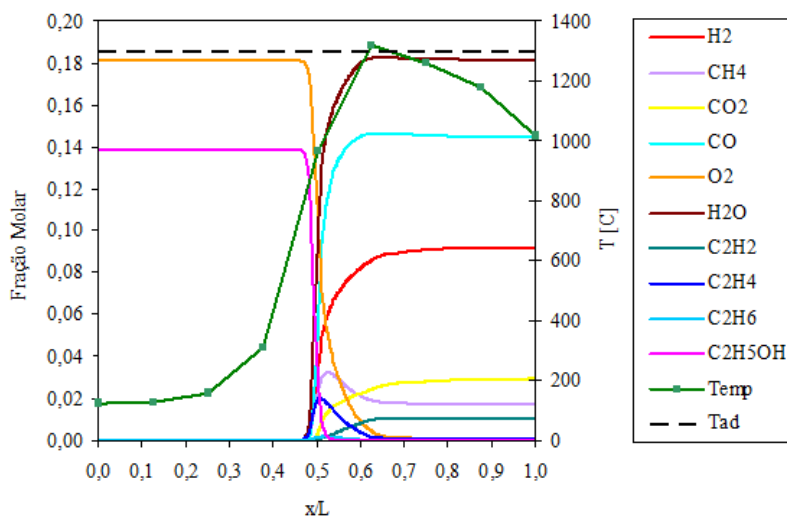


Figura 4.29 – Frações molares para combustão de etanol e ar com $\Phi = 2,3$ em um reator tipo *plug flow* de 80 mm de comprimento e perfil de temperatura de acordo com as medições realizadas no queimador (mecanismo de Marinov, 1999).

Tabela 4.3 - Frações molares para combustão de etanol, $\Phi = 2,3$.

Espécie Química	Plug flow (T_{ad})		Plug flow (Perfil de temp.)		Medições (Base seca)
	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca	
H ₂	1,79E-01	2,05E-01	9,21E-02	1,13E-01	
CO	1,63E-01	1,86E-01	1,45E-01	1,77E-01	1,55E-01
CO ₂	3,90E-02	4,45E-02	2,95E-02	3,60E-02	5,12E-02
H ₂ O	1,23E-01	-	1,81E-01	-	
CH ₄	1,44E-08	1,65E-08	1,79E-02	2,19E-02	
CH ₂ O	2,29E-08	2,61E-08	7,09E-07	8,66E-07	
C ₂ H ₂	2,68E-13	3,05E-13	1,02E-02	1,24E-02	
C ₂ H ₄	6,17E-15	7,04E-15	4,88E-04	5,97E-04	
C ₂ H ₆	5,68E-18	6,47E-18	1,68E-05	2,06E-05	
CH ₃ HCO	2,95E-16	3,37E-16	7,05E-08	8,61E-08	
C ₂ H ₅ OH	4,95E-21	0,00E+00	1,23E-09	1,50E-09	
N ₂	4,95E-01	5,65E-01	5,24E-01	6,40E-01	

4.2.4 Discussões sobre a produção de gás de síntese

Os testes de combustão rica indicaram faixas de estabilidade diferentes para os três combustíveis. Operando com o gás natural, a faixa de estabilidade do queimador vai de $\Phi=1,3$ até $\Phi=1,5$, enquanto que para o butano esta faixa é de $\Phi=1,8$ a $\Phi=2,1$ e para o etanol de $\Phi=2,0$ a $\Phi=2,3$.

O limite superior de inflamabilidade do gás natural é significativamente menor ($\Phi=1,67$ para o gás natural contra $\Phi=2,8$ para o butano e etanol) e por isso obteve-se uma faixa de estabilidade em razões de equivalência menores, ou seja, mais próximas da condição estequiométrica. Por estarem mais próximos da razão estequiométrica, os pontos de operação com gás natural apresentam uma cinética química mais rápida e uma produção de H₂ e CO menor. Foi visto que a máxima produção de gás de síntese para este queimador operando com gás natural seria de aproximadamente 18,9% em volume, sendo 8,5% de H₂ e 10,4% de CO.

Na combustão de butano e etanol foi possível obter chamas estáveis em razões de equivalência mais altas, onde a produção de H₂ prevista pelo equilíbrio químico é maior, chegando a 17,8% para o butano e 20,5% para o etanol. Porém, em razões de equivalência mais

altas a cinética química é mais lenta e o tempo de residência no queimador poroso não é suficiente para que a mistura atinja o equilíbrio. Isso faz com que a produção real de H_2 seja menor que a quantidade prevista pelo equilíbrio químico. Cálculos realizados para um reator *plug flow* com o mesmo comprimento do queimador poroso, com a mesma velocidade média dos reagentes e com o perfil de temperatura medido nos testes, mostraram que a produção de H_2 diminuiria para 10,5% na combustão de butano e 11,3% na combustão de etanol. Isso resultou em uma produção máxima de gás de síntese estimada em 26,4% para o butano e 29% para o etanol.

Os resultados mostraram que a maior produção de H_2 permitida pelo queimador utilizado acontece na combustão de etanol (11,3%). Outra maneira de avaliar o potencial de produção de H_2 para cada combustível é através do cálculo da razão entre a massa de hidrogênio disponível nos reagentes e a massa total da mistura. A Tabela 4.4 mostra a razão entre as massas de H, C e O e a massa total dos reagentes. Observa-se na tabela que, assim como observado nos resultados obtidos anteriormente, tem-se uma quantidade maior de hidrogênio nas misturas de etanol, seguido do butano e do gás natural.

Tabela 4.4 - Razão entre a massas de H, C e O e a massa total da mistura reagente.

Combustível	Φ	m_H / m_{total}	m_C / m_{total}	m_O / m_{total}
Gás Natural	1,3	0,0170	0,0548	0,2174
	1,4	0,0182	0,0587	0,2162
	1,5	0,0194	0,0625	0,2151
Butano	1,8	0,0181	0,0867	0,2087
	1,9	0,0190	0,0910	0,2075
	2,0	0,0198	0,0952	0,2063
	2,1	0,0207	0,0994	0,2051
Etanol	2,0	0,0238	0,0953	0,2540
	2,1	0,0248	0,0991	0,2549
	2,2	0,0257	0,1029	0,2557
	2,3	0,0267	0,1066	0,2565

Foi visto que o diagrama de estabilidade para combustão rica de gás natural apresentou características distintas dos diagramas obtidos para combustão rica de butano e de etanol. As velocidades de chama obtidas no experimento são da mesma ordem que a velocidade de chama laminar e a faixa de velocidades em cada razão de equivalência é estreita. Além disso, foi observada uma perda de calor significativa que resultou em temperaturas abaixo da temperatura de chama adiabática. Por outro lado, na combustão de butano e etanol as velocidades estão acima da velocidade de chama laminar e a faixa de velocidades em cada razão de equivalência é mais ampla. A possibilidade de operar com maiores velocidades de chama representa uma vantagem para produção de gás de síntese. Em velocidades mais altas a vazão de reagentes é maior e conseqüentemente o volume de gás de síntese produzido com o mesmo tamanho de queimador também é maior.

A produção de gás de síntese pode ser aumentada através de modificações no queimador poroso que resultem na diminuição das perdas de calor e que possibilitem obter chamas estáveis em razões de equivalência ainda mais altas, onde a produção de H_2 é maior. Vale lembrar que para os três combustíveis testados não foi possível ultrapassar o limite superior de inflamabilidade com o queimador utilizado. A seleção de um meio poroso mais adequado, por exemplo, pode influenciar significativamente na estabilidade de chama do queimador. No trabalho de combustão de metanol realizado por Pedersen-Mjaanes *et al.* (2005) foram testados dois queimadores diferentes, o primeiro possui uma REC feita de uma espuma de alumina com 8 ppc e 47,2 mm de comprimento e o segundo possui uma REC de 80 mm de comprimento formada por esferas de alumina de 3,5 mm de diâmetro. Para o segundo queimador foi possível obter chamas estáveis em razões de equivalência até 52% maiores que no primeiro queimador. O aumento do comprimento da REC de 47,2 mm para 80 mm fez com que a recirculação de calor aumentasse e a chama perdesse menos calor para o ambiente, permitindo chamas estáveis em razões de equivalência mais altas. Além disso, o aumento do comprimento do queimador resulta no aumento do tempo de residência dos reagentes, permitindo que a mistura se aproxime mais da composição de equilíbrio químico.

Outra maneira de reduzir a perda de calor é aumentar o diâmetro do queimador. Com o aumento do diâmetro, a razão entre a área superficial lateral e o volume do queimador diminui, fazendo com que as perdas de calor se tornem menos representativas em relação à energia gerada.

A eficiência térmica do queimador para combustão rica de gás natural, butano e etanol foi calculada e os resultados estão apresentados na Figura 4.30. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** O cálculo considera a entalpia dos reagentes como energia de entrada e a entalpia dos produtos como energia de saída. O cálculo da entalpia dos produtos foi baseado na composição de equilíbrio químico e na temperatura medida na saída do queimador.

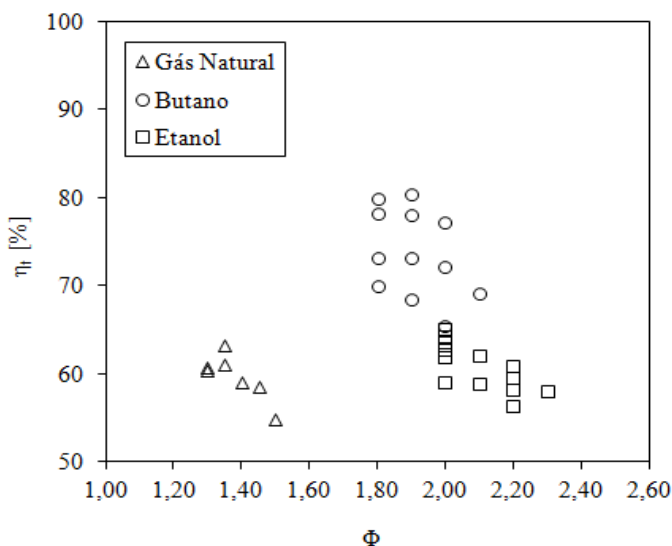


Figura 4.30 – Eficiência térmica do queimador poroso operando com gás natural, butano e etanol.

O queimador apresentou eficiências mais baixas operando com gás natural. Esta tendência já foi discutida anteriormente na seção 4.2.1.1., onde foi mostrado que as perdas de calor para combustão rica de gás natural foram mais significativas. Observa-se no gráfico que a eficiência do queimador ficou entre 55% e 63%.

Para combustão de etanol o queimador apresentou eficiências entre 56% e 65%, praticamente a mesma faixa observada na combustão de gás natural. Isto se deve ao gasto de energia necessário para pré-aquecer o ar e o etanol, que reduz a eficiência térmica do queimador em até 20%.

As maiores eficiências foram observadas na combustão de butano. Obtiveram-se eficiências entre 65% e 80%.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou a combustão rica de gás natural, butano e etanol em um queimador poroso, visando ao desenvolvimento de reatores para produção de gás de síntese. A combustão pobre em combustível também foi explorada com intuito de validar o funcionamento da bancada experimental. Para cada combustível testado foram apresentados os diagramas de estabilidade de chama, perfis de temperatura no interior do meio poroso e medições da composição dos produtos de combustão rica.

As principais conclusões obtidas neste trabalho são as seguintes:

1. O sistema de alimentação de combustível desenvolvido para a combustão de líquidos foi capaz de promover a evaporação completa do etanol e pré-misturar os reagentes adequadamente. Além disso, o sistema de alimentação empregado permitiu medir e controlar a vazão de etanol, diferentemente da maioria dos trabalhos de combustão de líquidos em meio poroso que utilizam um bico injetor com vazão fixa e possuem apenas um controle da vazão de ar.
2. Na combustão pobre de gás natural foram observadas características típicas da combustão em meios porosos que já foram reportadas por diversos autores em trabalhos realizados com metano. Entre elas, a velocidade de chama acima da velocidade de chama laminar (até 4,4 vezes superior) e a existência de uma faixa de velocidades de chama em cada razão de equivalência. Em $\Phi=0,5$, por exemplo, obtiveram-se pontos de operação estável com velocidades de chama entre 22,5 cm/s e 32,5 cm/s. Também foi observada a ampliação do limite inferior de inflamabilidade em 20% e a medição de temperaturas até 206°C acima da temperatura de chama adiabática correspondente. Essas características são atribuídas à recirculação de calor promovida pelo meio poroso.
3. A combustão pobre de butano apresentou as mesmas características observadas na combustão pobre de gás natural. Foram obtidas velocidades de chama acima da velocidade de chama laminar, o limite inferior de inflamabilidade foi ampliado em 21% e foram medidas temperaturas até 146°C acima da temperatura de chama adiabática. Além disso, obteve-se uma faixa de velocidades de chama em cada

razão de equivalência, que para $\Phi=0,55$ foi de $u_{ch}=15$ cm/s até $u_{ch}=25$ cm/s. A máxima razão de equivalência onde foi possível obter uma chama estável sem ultrapassar o limite de temperatura máxima de operação foi $\Phi=0,60$.

4. Os resultados de combustão pobre de etanol não foram apresentados em função das incertezas de medição da vazão de combustível, que podem chegar a 50%. O sistema de alimentação de etanol utilizado é mais adequado para testes de combustão rica, onde a vazão de combustível exigida é maior.

5. Na combustão rica de gás natural foram observadas características distintas das observadas na combustão pobre de gás natural e butano. As velocidades de chama obtidas no experimento são da mesma ordem que a velocidade de chama laminar e faixa de velocidades em cada razão de equivalência é estreita. Além disso, as máximas temperaturas medidas são em média 20% menores que a temperatura de chama adiabática e o limite superior de inflamabilidade não foi ampliado. Um comportamento semelhante a este já foi reportado na literatura anteriormente. A perda de calor do queimador foi calculada através de um balanço de energia e os resultados confirmaram que na combustão rica de gás natural as perdas foram mais significativas.

6. Na combustão rica de butano e etanol foram observadas as mesmas características obtidas na combustão pobre de gás natural e butano, ou seja, velocidades de chama acima da velocidade de chama laminar, uma faixa de velocidades de chama em cada razão de equivalência e temperaturas iguais ou acima da temperatura de chama adiabática. A exceção foi o limite superior de inflamabilidade, que assim como na combustão rica de gás natural, também não foi ampliado na combustão rica de butano nem de etanol.

7. Medições de CO e CO₂ foram realizadas para os três combustíveis e os resultados indicaram a mesma tendência prevista pelo equilíbrio químico, ou seja, com o aumento da razão de equivalência têm-se o aumento da quantidade de CO e a diminuição da quantidade de CO₂.

8. Para o gás natural, as medições de CO indicaram quantidades acima do equilíbrio químico. Isso mostra que parte do CO não está sendo convertido em CO₂, possivelmente devido à existência de regiões mais

frias próximas à parede do queimador, resultante do formato da chama e da perda de calor pelas laterais.

9. As simulações de um reator *plug flow* realizadas no software *Chemkin*® para a combustão de gás natural e ar em $\Phi=1,50$ mostraram que as condições de temperatura e tempo de residência no queimador são suficientes para que os produtos se aproximem da composição de equilíbrio químico. Os resultados também mostraram que a produção de gás de síntese para essa condição analisada seria de 18,9% em volume, sendo 8,5% de H_2 e 10,4% de CO.

10. As medições de CO e CO_2 para combustão rica de butano indicaram quantidades abaixo e acima do equilíbrio químico, respectivamente. As simulações em um reator *plug flow* mostraram que para $\Phi=2,1$ a cinética química é muito lenta, tornando o tempo de residência no queimador insuficiente para a mistura atingir o equilíbrio químico. Com isso, grande parte do hidrogênio permanece nas moléculas de H_2O e a produção de H_2 é 41% menor que a quantidade prevista pelo equilíbrio químico. Caso houvesse mais tempo de residência, as moléculas de H_2O continuariam reagindo com CH_4 e C_2H_2 para formar mais H_2 e CO. A produção de gás de síntese para essa condição analisada é de 26,4%, sendo 10,5% de H_2 e 15,9% de CO.

11. A análise da composição dos produtos de combustão rica de etanol apresentou resultados semelhantes aos de combustão rica de butano. As quantidades medidas de CO e CO_2 foram sempre menores e maiores que a composição do equilíbrio químico, respectivamente. A análise no reator *plug flow* foi realizada para a combustão de etanol em $\Phi=2,3$, que foi a maior razão de equivalência onde foi possível obter uma chama estável no queimador. De maneira semelhante, a cinética é muito lenta para $\Phi=2,3$ e o tempo de residência no queimador não é suficiente para que a mistura atinja o equilíbrio químico, fazendo com que a produção real de H_2 seja 45% menor que a quantidade prevista pelo equilíbrio. Sendo assim, a produção de gás de síntese foi de 29%, composto por 11,3% de H_2 e 17,7% de CO.

12. Nos testes com gás natural a eficiência térmica do queimador poroso ficou entre 55% e 63%. Para combustão de etanol obteve-se uma faixa semelhante, entre 56% e 65%, porém o cálculo inclui o gasto de energia necessário para pré-aquecer o ar e o etanol, que acaba reduzindo a

eficiência do queimador em cerca de 20%. As maiores eficiências foram obtidas nos testes com butano, desde 65% até 80%.

13. Comparando os resultados dos três combustíveis, a maior produção de gás de síntese alcançada com esse experimento aconteceu para combustão de etanol em $\Phi=2,3$, chegando a 29% em volume. O uso de etanol se torna ainda mais vantajoso por ser um combustível renovável produzido a partir de biomassa.

14. Foi visto que a produção de gás de síntese pode ser aumentada através de modificações no projeto do queimador que diminuam as perdas de calor, aumentem o tempo de residência da mistura reagente e aumentem a recirculação de calor para permitir chamas estáveis em razões de equivalência mais elevadas.

Os resultados apresentados nesta dissertação fornecem subsídios para o desenvolvimento de equipamentos compactos e mais eficientes para produção de gás de síntese. Ao tirar proveito das vantagens da combustão em meios porosos, a técnica da oxidação parcial pode se tornar uma maneira atrativa de produzir gás de síntese para alimentar células a combustível e fornecer hidrogênio para processos industriais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas conclusões obtidas ao final deste estudo, são sugeridos os seguintes trabalhos:

1. Pesquisar diferentes materiais e configurações de meio poroso para aumentar a faixa de estabilidade do queimador;
2. Medir a composição completa dos produtos através de cromatografia gasosa;
3. Avaliar a influência do comprimento do queimador na produção de gás de síntese. Aumentando o comprimento tem-se um maior tempo de residência dos reagentes e uma menor perda de calor da chama para o ambiente;
4. Avaliar a influência do diâmetro do queimador na produção de gás de síntese. Com o aumento do diâmetro as vazões de ar e combustível são maiores, permitindo um controle mais preciso e reduzindo as incertezas de medição. Além disso, com o aumento do diâmetro as perdas de calor se tornam menos significativas;

5. Avaliar o formato da frente de chama através de medições de temperatura ao longo do raio do queimador com o objetivo de auxiliar no estudo da estabilidade de chamas ricas em meio poroso;
6. Pesquisar o uso de meios porosos catalíticos com o objetivo de obter maior seletividade para hidrogênio;
7. Pesquisar a adição de água na mistura reagente para converter CO e H₂O em mais H₂ e CO₂ através da reação *water-gas shift*.

REFERÊNCIAS

- AL-HAMAMRE, Z.; VOSS, S.; TRIMIS, D. **Hydrogen production by thermal partial oxidation of hydrocarbon fuels in porous media based reformer**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, pp. 827-832, 2009.
- AL-HAMAMRE, Z.; AL-ZOUBI, A. **The use of inert porous media based reactors for hydrogen production**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, pp. 1971-1986, 2010.
- AL-HAMAMRE, Z.; HARARAH, M.A.; **Hydrogen production by thermal partial oxidation of ethanol: Thermodynamics and kinetics study**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, pp. 5367-5377, 2010.
- BARRA, A. J.; DIEPVEN, G.; ELLZEY, J. L.; HENNEKE, M. R. **Numerical study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner**. *Combustion and Flame*, v. 134, pp. 369-379, 2003.
- BARRA, A. J.; ELLZEY, J. L. **Heat recirculation and heat transfer in porous burners**. *Combustion and Flame*, v. 137, pp. 230-241, 2004.
- CATAPAN, R. C. **Estudo do mecanismo combinado térmico e fluidodinâmico de estabilização de chama em um queimador poroso radiante e sua operação em ambiente de elevada temperatura**. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- CATAPAN, R. C.; MOSER, R. M.; OLIVEIRA, A. A. M. **Hydrogen production from ethanol partial oxidation in a porous media reactor: state of the art and the development of an experimental apparatus**. In: 12th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Belo Horizonte, Brasil, 2008.
- CATAPAN, R. C.; OLIVEIRA, A. A. M.; COSTA, M. **Non-uniform velocity profile mechanism for flame stabilization in a porous radiant burner**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 35, pp. 172-179, 2011.
- COELHO, P. J.; COSTA, M. **Combustão**. Portugal: Orion, 2007.
- COSTA, L.O.O.; SILVA, A.M.; BORGES, L.P.E.; MATTOS, L.V.; NORONHA, F.B. **Partial oxidation of ethanol over Pd/CeO₂ and Pd/Y₂O₃ catalysts**. *Catalysis Today*, v. 138, pp. 147-151, 2008.
- ELLZEY, J. L. e GOEL, R. **Emissions of CO and NO from a two stage porous media burner**. *Combustion Science and Technology*, v. 107, pp. 81-91, 1995.

FRASSOLDATI, A., GRANA, R., CUOCI, A., FARAVELLI, T., RANZI, e. **A wide range kinetic modelling study of laminar flame speeds of reference fuels and their mixtures.** Processes and Technologies for a Sustainable Energy, Ischia, 2010.

FUSE, T.; KOBAYASHI, N.; HASATANI, M. **Combustion characteristics of ethanol in a porous ceramic burner and ignition improved by enhancement of liquid-fuel intrusion in the pore with ultrasonic irradiation.** Experimental Thermal and Fluid Science, v. 29, pp. 467-476, 2005.

GLASSMAN, I. **Combustion.** 2. ed. San Diego: Academic Press Inc., 1987. 501 p.

HARDESTY, D. R.; WEINBERG, F. J. **Burners producing large excess enthalpies,** Combustion Science and Technology, v. 8, pp. 201-214, 1974.

HAYASHI, T. C., MALICO, I., PEREIRA, J. C. F., **Three-dimensional modelling of a two-layer porous burner for household applications.** Computers and Structures, v. 82, pp. 1543-1550, 2004.

HOWELL, J. R.; HALL, M. J.; ELLZEY, J. L. **Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 22, pp. 121-145, 1996.

HSU, P. F.; MATTHEWS, R. D. **The necessity of using detailed kinetics in models for premixed combustion within porous media.** Combustion and Flame, v. 93, pp. 457-466, 1993.

HSU, S.N.; BI, J.L.; WANG, W.F.; YEH, C.T.; WANG, C.B. **Low-temperature partial oxidation of ethanol over supported platinum catalysts for hydrogen production.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 33, pp. 693-699, 2008.

JUGJAI, S.; WONGPANIT, N.; LAOKETKAN, T.; NOKKAEW, S. **The combustion of liquid fuels using a porous medium.** Experimental Thermal and Fluid Science, v. 26, pp. 15-23, 2002.

KAPLAN, M.; HALL, M. J. **The combustion of liquid fuels within a porous media radiant burner.** Experimental Thermal and Fluid Science, v. 11, pp. 13-20, 1995.

KENNEDY, L.A., BINGUE, J.P., SAVELIEV, A.V., FRIDMAN, A.A., FOUTKO, S.I. **Chemical structures of methane-air filtration combustion waves for fuel-lean and fuel-rich conditions.** Proceedings of the Combustion Institute, v. 28, p. 1431-1438, 2000.

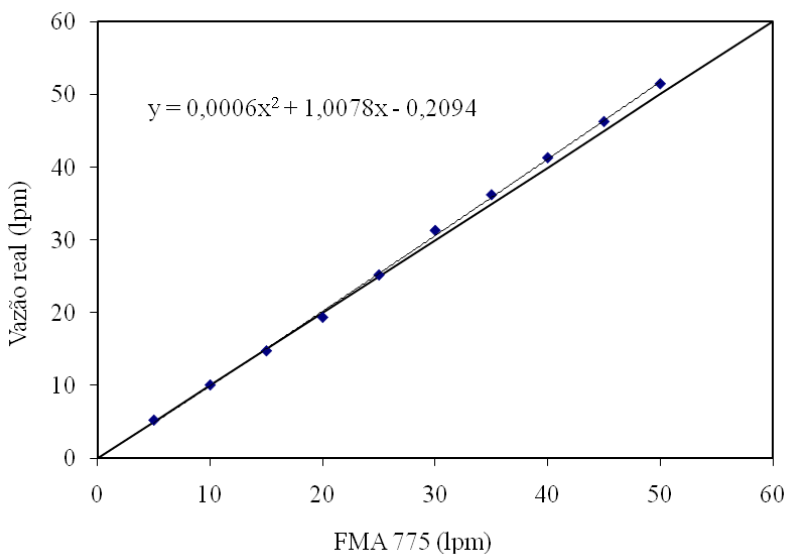
KHANNA, R.; GOEL, R.; ELLZEY, J. L. **Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner.** Combustion Science and Technology, v. 99, pp. 133-142, 1994.

- LAW, C.K. *Combustion Physics*. Cambridge University Press, Nova Iorque, 2006.
- MARINOV, N.M.; PITZ, W.J.; WESTBROOK, C.K.; VINCITORE, A.M.; CASTALDI, M.J.; SENKAN, S.M. **Aromatic and polycyclic aromatic hydrocarbon formation in a laminar premixed n-butane flame**. *Combustion and Flame*, v. 114, p. 192–213, 1998.
- MARINOV, N.M. **A Detailed Chemical Kinetic Model for High Temperature Ethanol Oxidation**. *International Journal of Chemical Kinetics*, v. 31, p. 183–220, 1999.
- MITAL, R.; GORE, J. P.; VISKANTA, R. **A study of the structure of submerged reaction zone in porous ceramic radiant burners**. *Combustion and flame*, v. 111, pp. 175-184, 1997.
- MUJEEBU, M. A.; ABDULLAH, M. Z.; BAKAR, M.Z.A.; MOHAMED A.A.; MUHAD, R.M.N.; ABDULLAH, M.K. **Combustion in porous media and its applications – a comprehensive survey**. *Journal of Environmental Management*, v. 90, pp. 2287-2312, 2009a.
- MUJEEBU, M. A.; ABDULLAH, M. Z.; BAKAR, M.Z.A.; MOHAMED A.A.; ABDULLAH, M.K. **Applications of porous media combustion technology – a review**. *Applied Energy*, v. 86, pp. 1365-1375, 2009b.
- PEREIRA, F. M. **Medição de características térmicas e estudo do mecanismo de estabilização de chama em queimadores porosos radiantes**. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- PASTORE, A.; MASTORAKOS, E. **Syngas production from liquid fuels in a non-catalytic porous burner**. *Fuel*, v. 90, pp. 64-76, 2011.
- PEDERSEN-MJAANES, H.; CHAN, L.; MASTORAKOS, E. **Hydrogen production from rich combustion in porous media**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 30, pp. 579-592, 2005.
- RODRIGUES, C. P.; SILVA, V. T.; SCHMAL, M. **Partial oxidation of ethanol on Cu/alumina/cordierite monolith**. *Catalysis Communications*, v. 10, pp. 1697-1701, 2009.
- SALGE, J.R.; DELUGA, G.A.; SCHMIDT, L.D. **Catalytic partial oxidation of ethanol over noble metal catalysts**. *Journal of Catalysis*, v. 235, pp. 69-78, 2005.
- SATHE, S. B.; PECK, R. E.; TONG, T. W. **A numerical analysis of heat transfer and combustion in porous radiant burners**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 33, pp.1331-1338, 1990.

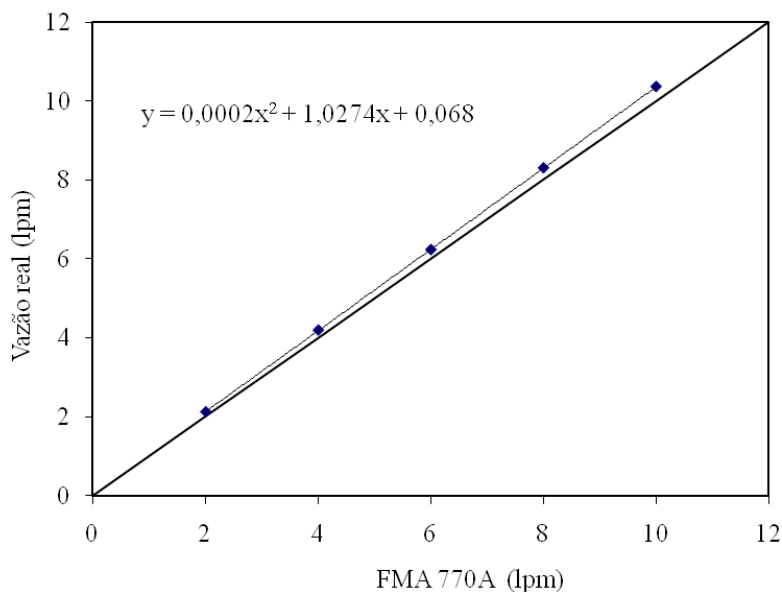
- SEGAL, R.S.; CARRADO, K.A.; MARSHALL, C.L.; ANDERSON, K.B. **Catalytic decomposition of alcohols, including ethanol, for in situ H₂ generation in a fuel stream using a layered double hydroxide-derived catalyst**. Applied Catalysis, v. 248, pp. 33-45, 2003.
- TRIMIS, D.; DURST, F. **Combustion in a porous medium – advances and applications**. Combustion Science and Technology, v. 121, pp. 153-168, 1996.
- URNS, S. R. **An introduction to combustion – Concepts and applications**. 2ª Edição. Mcgraw-Hill, 2000.
- VIJAYKANT, S.; AGRAWAL, A.K. **Liquid fuel combustion within silicon-carbide coated carbon foam**. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 32, pp. 117-125, 2007.
- VOGEL, B.J., ELLZEY, J.L. **Subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner**. Combustion Science and Technology, v. 177, p. 1323–1338, 2005.
- WANAT, E.C.; SUMAN, B.; SCHMIDTt, L.D. **Partial oxidation of alcohols to produce hydrogen and chemicals in millisecond-contact time reactors**. Journal of Catalysis, V. 235, pp. 18-27, 2005.
- WOOD, S., HARRIS, A.T. **Porous burners for lean-burn applications**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 34, p. 667–684, 2008.
- YOSHIZAWA, Y.; SASAKI, K.; ECHIGO, R. **Analitical study of the structure of radiation controlled flame**. International Journal of Heat and Mass Transfer , v. 31, pp. 311-319, 1988.

APÊNDICE A – Calibração dos medidores de vazão

A seguir, são apresentadas as curvas de calibração dos medidores de vazão de ar e de gás combustível. O sistema de medição utilizado como referência na calibração do medidor de ar foi um gasômetro e do medidor de gás um bolhômetro. Um polinômio de segundo grau foi ajustado sobre os pontos de medição para representar sua tendência.



A.1 – Curva de calibração do medidor de vazão de ar.



A.2 – Curva de calibração do medidor de vazão de gás combustível.

A incerteza de medição dos medidores de vazão foi determinada assumindo uma confiabilidade de 95%. Para o medidor de ar a incerteza encontrada foi de $\pm 0,7$ lpm e para o medidor de gás $\pm 0,1$ lpm.

APÊNDICE B – Propagação das incertezas de medições

Incertezas dos resultados da razão de equivalência e da velocidade de chama para combustão de gás natural e butano

A incerteza de medição de Φ e u_{ch} foi determinada através da análise de propagação das incertezas de medição da vazão volumétrica de ar ($IM_{\dot{V}_{ar}} = \pm 0,7$ lpm), de gás combustível ($IM_{\dot{V}_c} = \pm 0,1$ lpm) e do diâmetro do queimador ($IM_{D_q} = \pm 0,001$ m) a partir das seguintes equações:

$$IM_{\Phi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{V}_c} IM_{\dot{V}_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{V}_{ar}} IM_{\dot{V}_{ar}}\right)^2} \quad (B.1)$$

$$IM_{u_{ch}} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{V}_c} IM_{\dot{V}_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{V}_{ar}} IM_{\dot{V}_{ar}}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial D_q} IM_{D_q}\right)^2} \quad (B.2)$$

Os valores das incertezas de medição de Φ e u_{ch} para os pontos de operação com gás natural e butano são apresentados na Tabela B.1 e na Tabela B.2, respectivamente.

Tabela B.1 – Incerteza dos resultados de Φ e u_{ch} para os pontos de operação com gás natural.

Φ	u_{ch} (cm/s)	IM_{Φ} (\pm)	$IM_{u_{ch}}$ (\pm)	Erro $_{\Phi}$ (%)	Erro $_{u_{ch}}$ (%)
0,40	7,5	0,111	0,671	27,7	8,9
0,45	15	0,056	0,849	12,5	5,7
0,45	12,5	0,068	0,781	15,0	6,2
0,50	22,5	0,038	1,082	7,7	4,8
0,50	25	0,034	1,166	6,9	4,7

0,50	30	0,029	1,342	5,7	4,5
0,50	32,5	0,026	1,432	5,3	4,4
0,55	35	0,025	1,523	4,6	4,4
1,30	20	0,062	1,000	4,8	5,0
1,30	22,5	0,055	1,082	4,2	4,8
1,35	17,5	0,073	0,922	5,4	5,3
1,35	20	0,064	1,000	4,7	5,0
1,40	15	0,087	0,849	6,2	5,7
1,45	12,5	0,107	0,781	7,4	6,2
1,50	10	0,137	0,721	9,1	7,2

Tabela B.2 – Incerteza dos resultados de Φ e u_{ch} para os pontos de operação com butano.

Φ	u_{ch} (cm/s)	IM_{Φ} (\pm)	$IM_{u_{ch}}$ (\pm)	Erro $_{\Phi}$ (%)	Erro $_{u_{ch}}$ (%)
0,45	10	0,267	0,721	59,3	7,2
0,50	10	0,268	0,721	53,5	7,2
0,50	15	0,178	0,849	35,7	5,7
0,55	15	0,179	0,849	32,5	5,7
0,55	20	0,134	1,000	24,4	5,0
0,55	25	0,107	1,166	19,5	4,7
0,60	25	0,108	1,166	17,9	4,7
0,60	30	0,090	1,342	15,0	4,5
0,60	35	0,077	1,523	12,8	4,4
1,80	20	0,150	1,000	8,3	5,0
1,80	25	0,120	1,166	6,6	4,7
1,80	30	0,100	1,342	5,5	4,5
1,80	35	0,085	1,523	4,7	4,4

1,90	15	0,202	0,849	10,6	5,7
1,90	20	0,151	1,000	8,0	5,0
1,90	25	0,121	1,166	6,4	4,7
1,90	30	0,101	1,342	5,3	4,5
2,00	10	0,306	0,721	15,3	7,2
2,00	15	0,204	0,849	10,2	5,7
2,00	20	0,153	1,000	7,6	5,0
2,10	10	0,310	0,721	14,7	7,2

Incertezas dos resultados da razão de equivalência e da velocidade de chama para combustão de etanol

A incerteza de medição dos valores de Φ e u_{ch} para combustão de etanol foi determinada através de uma análise da propagação das incertezas de medição da vazão de ar, de combustível, do diâmetro do queimador e da temperatura da mistura reagente na entrada do queimador. No cálculo foram utilizadas as incertezas de medição apresentadas na Tabela B.3 e as equações B.3 e B.4. Para a incerteza de medição da vazão de combustível foi adotado o máximo desvio padrão obtido na calibração do bico injetor, com confiabilidade de 95%. Para a incerteza de medição da temperatura dos reagentes foi adotado a máxima variação de temperatura entre as medições realizadas. As incertezas de medição na vazão de ar e no diâmetro do queimador permanecem as mesmas dos testes com combustíveis gasosos.

Tabela B.3 – Incertezas de medição de \dot{m}_{ar} , \dot{m}_c , D_q , T_r .

Variável	IM
\dot{m}_{ar}	$\pm 0,82 \text{ g/min}$
\dot{m}_c	$\pm 0,5 \text{ g/min}$
D_q	$\pm 0,001 \text{ m}$
T_r	$\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$

$$IM_{\Phi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{m}_c} IM_{\dot{m}_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{m}_{ar}} IM_{\dot{m}_{ar}}\right)^2} \quad (\text{B.3})$$

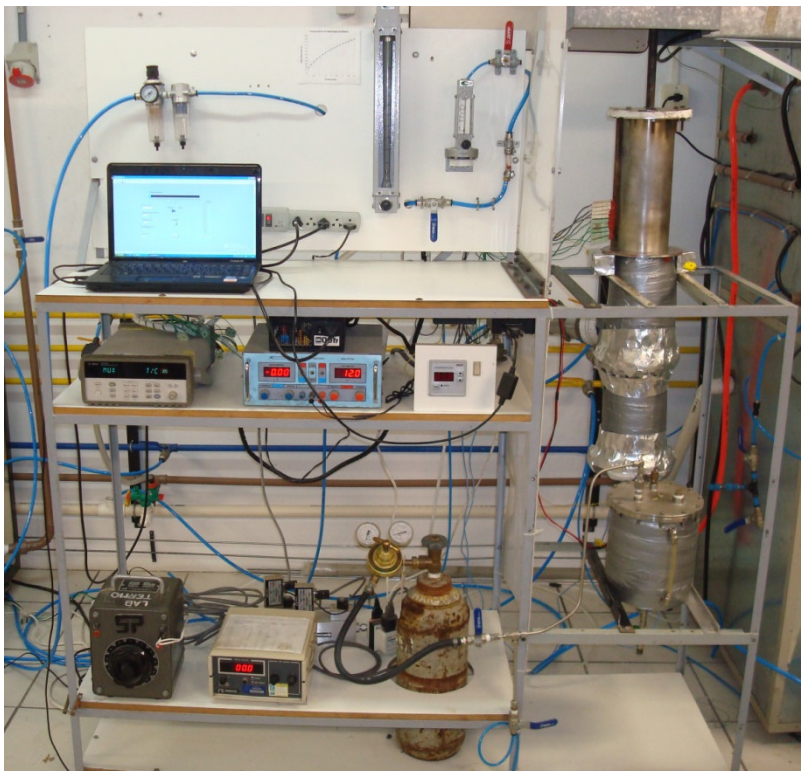
$$IM_{u_{ch}} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{m}_c} IM_{\dot{m}_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{m}_{ar}} IM_{\dot{m}_{ar}}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial D_q} IM_{D_q}\right)^2} \quad (\text{B.4})$$

Os valores das incertezas de medição de Φ e u_{ch} para os pontos de operação com etanol são apresentados na Tabela B.4.

Tabela B.4 – Incerteza dos resultados de Φ e u_{ch} para os pontos de operação com etanol.

Φ	u_{ch} (cm/s)	IM_{Φ} (\pm)	$IM_{u_{ch}}$ (\pm)	Erro $_{\Phi}$ (%)	Erro $_{u_{ch}}$ (%)
2,00	37,5	0,14	2,23	6,91	5,96
2,00	42,5	0,12	2,49	6,10	5,86
2,00	45,0	0,12	2,62	5,76	5,82
2,00	47,5	0,11	2,75	5,46	5,79
2,00	50,0	0,10	2,88	5,18	5,77
2,00	52,5	0,10	3,02	4,94	5,74
2,10	37,5	0,14	2,23	6,66	5,96
2,10	40,0	0,13	2,36	6,25	5,91
2,20	24,0	0,22	1,57	10,06	6,54
2,20	26,0	0,20	1,66	9,29	6,40
2,20	28,0	0,19	1,76	8,62	6,29
2,20	30,0	0,18	1,86	8,05	6,19
2,30	22,5	0,24	1,50	10,39	6,67

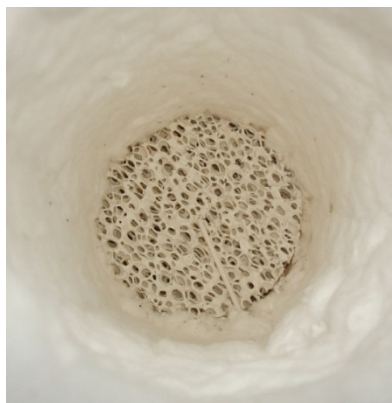
APÊNDICE C – Fotos do experimento



Bancada experimental.



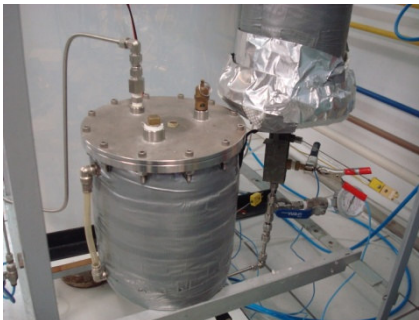
Queimador poroso.



Vista interna do queimador.



Parte do sistema de alimentação de etanol: manômetro, vela incandescente, termopar e bico injetor.



Sistema de alimentação de etanol montado na bancada.



Sonda refrigerada colocada na saída do tubo de exaustão do queimador.